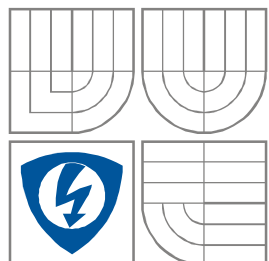


VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A
KOMUNIKAČNÍCH TECHNOLOGIÍ
ÚSTAV ELEKTROTECHNOLOGIE

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION
DEPARTMENT OF ELECTRICAL AND ELECTRONIC TECHNOLOGY

VLIV MNOŽSTVÍ PÁJKY A IZOTERMÁLNÍHO STÁRNUTÍ NA VODIVOST PÁJENÉHO SPOJE

SOLDER JOINT CONDUCTIVITY – INFLUENCE OF SOLDER VOLUME AND ISOTHERMAL AGING

DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Ing. Ladislav Mach

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. Jiří Starý, Ph.D.

BRNO, 2012

Zde bude vložen originální list zadání

ABSTRAKT

Diplomová práce se zabývá elektrickou vodivostí bezolovnatého pájeného spoje. V praktické části práce je popsána testovací metoda pro sledování elektrické vodivosti pájeného spoje. Pro experimenty je použito simulované pouzdro BGA se čtyřmi vývody (BGA4). Testované DPS jsou podrobeny izotermálnímu stárnutí a proudovému zatížení. Během izotermálního stárnutí je měřena elektrická vodivost a pomocí optického mikroskopu je pozorován růst intermetalické vrstvy (IMC). Pro testy jsou použity dva typy povrchové úpravy (OSP a ENIG) a tři průměry pájecích vývodů (pájecí slitina SAC405). Je vyhodnocen vliv poměru plocha spoje / objem pájky (S / V) na vodivost pájeného bezolovnatého spoje.

KLÍČOVÁ SLOVA

Elektrická vodivost, pájený spoj, bezolovnaté pájení, spolehlivost, metoda smáčecích vah, OSP, ENIG, IMC, SAC405, BGA4, izotermální stárnutí

ABSTRACT

The master thesis analyses electrical conductivity of lead-free solder joints. The test method design for monitoring the electrical conductivity of the soldered joint is described in the practical part. Simulated BGA package with four pin (BGA4) is used for experiments. Tested PCBs are subjected to isothermal aging and current load. During isothermal aging is measured electrical conductivity and optical microscope is used for intermetallic layer (IMC) growth observation. Two types of surface finish (OSP and ENIG) are used for tests and three diameters of solder terminal balls (solder alloy SAC405). The influence of the ratio area connection / solder volume (ratio S / V) on lead-free solder joints conductivity was evaluated.

KEYWORDS

Electric conductivity, solder joint, lead-free soldering, reliability, wetting balance test, OSP, ENIG, IMC, SAC405, BGA4, isothermal aging

MACH, L. *Vliv množství pájky a izotermálního stárnutí na vodivost pájeného spoje*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií. Ústav elektrotechnologie, 2012. 45 s. Vedoucí diplomové práce Ing. Jiří Starý Ph.D..

PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že svou diplomovou práci na téma Vliv množství pájky a izotermálního stárnutí na vodivost pájeného spoje jsem vypracoval samostatně pod vedením vedoucího diplomové práce a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou všechny citovány v práci a uvedeny v seznamu literatury na konci práce.

Jako autor uvedené diplomové práce dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením této diplomové práce jsem neporušil autorská práva třetích osob, zejména jsem nezasáhl nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a jsem si plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení § 152 trestního zákona č. 140/1961 Sb.

V Brně dne

.....

(podpis autora)

PODĚKOVÁNÍ

Děkuji vedoucímu diplomové práce Ing. Jiřímu Starému, Ph.D. za účinnou metodickou, pedagogickou a odbornou pomoc a další cenné rady při zpracování mé diplomové práce.

V Brně dne

.....

(podpis autora)

OBSAH

Seznam obrázků	ix
Seznam tabulek	xi
Úvod	12
1 Teorie pájeného spoje	13
1.1 Pájený spoj	13
1.1.1 Požadavky na pájený spoj	13
1.1.2 Smáčivost	14
1.1.3 Metoda smáčecích vah	15
1.1.4 Intermetalické vrstvy	18
1.1.5 Mikrovýbrus	19
1.2 Spolehlivost pájeného spoje	20
1.2.1 Stárnutí materiálů	21
1.2.2 Mechanické namáhání	21
1.2.3 Tepelné namáhání	21
1.2.4 Proudové namáhání	22
1.3 Povrchové úpravy	22
1.3.1 OSP	22
1.3.2 Chemický nikl / imersní zlato (Ni/Au)	22
1.4 Tavidla	23
1.4.1 Ecofrec TF40	24
1.4.2 TSF 6592	24
1.5 Bezolovnaté pájecí slitiny	24
1.5.1 Pájecí slitiny SAC	24
1.5.2 Pájecí slitiny SC	25
1.6 Procesní faktory u pájení přetavením	25
1.7 Elektrická vodivost pájeného spoje	26
1.7.1 Teplotní vliv na vodivost pájeného spoje	27
1.7.2 Vliv složení pájeného spoje na elektrickou vodivost	28
2 Praktická část	30
2.1 Návrh testovací DPS	30

2.2	Použité materiály	33
2.3	Realizace povrchové úpravy OSP.....	33
2.3.1	Postup pro odstranění staré povrchové úpravy OSP.....	33
2.3.2	Postup aplikace OSP Gliccoat F2	34
2.4	Pájení v přetavovací peci	35
2.4.1	Výpočet integrálu energie dodané pájenému spoji [12]	37
2.4.2	Postup při pájení	37
2.5	Metodika sledování elektrické vodivosti pájeného spoje	38
2.5.1	Použité přístroje	39
2.5.2	Postup měření elektrické vodivosti.....	40
2.6	Vyhodnocení naměřených výsledků a jejich diskuze	41
2.6.1	Porovnání povrchové úpravy OSP uskladněných DPS	41
2.6.2	Vyhodnocení plocha spoje/objem pájky	41
2.6.3	Vyhodnocení izotermálního stárnutí.....	43
2.6.4	Vyhodnocení kombinované zkoušky.....	45
2.6.5	Vyhodnocení růstu intermetalické vrstvy (IMC).....	46
2.6.6	Vliv IMC vrstvy na vodivost pájeného spoje	52
2.6.7	Možné směry vývoje této práce	53
3	ZÁVĚR	55
	Literatura	57
	Seznam symbolů, veličin a zkratk	60

SEZNAM OBRÁZKŮ

Obr. 1.1: Smáčení povrchu roztavenou pájkou.....	15
Obr. 1.2: Určení smáčecího úhlu	15
Obr. 1.3: Detailní pohled na zavěšený testovací vzorek v meniskografu.....	16
Obr. 1.4: Obecná smáčecí charakteristika (převzato z [8]).....	17
Obr. 1.5: Možné průběhy časové závislosti smáčecí síly (převzato z [8])	17
Obr. 1.6: Vznik intermetalických sloučenin v závislosti na složení pájecí slitiny (převzato z [4]).....	19
Obr. 2.1: Pájecí plošky staré testovací DPS (zvětšeno 40x).....	30
Obr. 2.2: Detaily pájecích plošek staré testovací DPS (zvětšeno 90x).....	30
Obr. 2.3: Vodivá vrstva testovací DPS (rozměry v mm).....	31
Obr. 2.4: Nepájivá maska testovací DPS (rozměry v mm).....	31
Obr. 2.5: Vodivá vrstva testovací součástky BGA4 (rozměry v mm).....	31
Obr. 2.6: Nepájivá maska testovací součástky BGA4 (rozměry v mm).....	31
Obr. 2.7: Pájecí plošky nové testovací DPS (zvětšeno 40x).....	32
Obr. 2.8: Detaily pájecích plošek nové testovací DPS (zvětšeno 90x).....	32
Obr. 2.9: Osazená testovací deska	32
Obr. 2.10: Mikrovýbrus pájeného spoje – a) zvětšeno 50x, b) zvětšeno 90x.....	33
Obr. 2.11: Porovnání povrchové úpravy OSP vyrobené ve firmě ČEMEBO s povrchovou úpravou vyrobenou v laboratoři VUT.....	35
Obr. 2.12: Pracoviště procesu pájení	36
Obr. 2.13: Podélný teplotní profil v průběžné přetavovací peci DIMA SMRO 0180 pro osazenou testovací DPS (viz. obr. 2.9)	36
Obr. 2.14: Připravená a) testovací DPS a b) BGA4.....	37
Obr. 2.15: Součástka BGA4 s naneseným tavidlem a osazená kuličkami pájky.....	38
Obr. 2.16: Čtyřbodová metoda pro měření velmi malých odporů.....	39
Obr. 2.17: Přípravek pro přepínání jednotlivých měřených pájených spojů	39
Obr. 2.18: Pracoviště pro měření elektrické vodivosti	41
Obr. 2.19: Časová závislost vodivosti pro povrchovou úpravu OSP – OSP	44
Obr. 2.20: Časová závislost vodivosti pro povrchovou úpravu Ni/Au - Ni/Au.....	44
Obr. 2.21: Časová závislost vodivosti pro povrchovou úpravu OSP – Ni/Au.....	45
Obr. 2.22: Porovnání výsledků kombinovaného stárnutí (p. ú. OSP – Ni/Au)	46

Obr. 2.23: Vzorek vyrobený pro sledování růstu IMC vrstvy	47
Obr. 2.24: Řez zapájeným vzorkem s povrchovou úpravou OSP	47
Obr. 2.25: Mikrovýbrusy pájených spojů s povrchovou úpravou OSP - OSP, kulový vývod o průměru 0,4 mm - zvětšeno 1000x	48
Obr. 2.26: Mikrovýbrus pájeného spoje s povrchovou úpravou OSP - OSP, kulový vývod o průměru 0,76 mm - zvětšeno 1000x	49
Obr. 2.27: Porovnání vypočítaných a naměřených hodnot pro povrchovou úpravu OSP – OSP a kulový vývod o průměru 0,4 mm.....	50
Obr. 2.28: Porovnání vypočítaných a naměřených hodnot pro povrchovou úpravu OSP – OSP a kulový vývod o průměru 0,76 mm.....	51
Obr. 2.29: Mikrovýbrusy pájených spojů s povrchovou úpravou Ni/Au, kulový vývod o průměru 0,4 mm - zvětšeno 1000x	52
Obr. 2.30: Mikrovýbrusy pájených spojů s povrchovou úpravou Ni/Au, kulový vývod o průměru 0,76 mm - zvětšeno 1000x	52
Obr. 2.31: Náhradní schéma zapájeného spoje.....	53

SEZNAM TABULEK

Tab. 1.1: Závislost úhlu smáčení na pájitelnosti.....	15
Tab. 1.2: Možné intermetalické sloučeniny pro různé pájky (převzato z [3]).....	18
Tab. 1.3: Vlastnosti intermetalických sloučenin [18]	19
Tab. 1.4: Fyzikální vlastnosti pájky SAC305 [10] a SN100C [11]	25
Tab. 1.5: Přehled elektrické vodivosti při 0 °C pro vybrané materiály [13].....	27
Tab. 1.6: Přehled teplotních součinitelů pro vybrané materiály [13]	28
Tab. 1.7: Vliv poměru cínu a olova v pájce na elektrickou vodivost [14].....	28
Tab. 1.8: Elektrická vodivost pro různý poměr složení Sn-Ag-Cu pájecí slitiny [14], [15], [20]	29
Tab. 1.9: Porovnání elektrické vodivosti intermetalických vrstev s mědí.....	29
Tab. 2.1: Seznam použitých měřicích přístrojů a zařízení.....	40
Tab. 2.2: Porovnání hodnot vodivosti povrchové úpravy OSP	41
Tab. 2.3: Naměřené hodnoty pájecích plošek testovací DPS a BGA4	42
Tab. 2.4: Vypočítané hodnoty pro pájecí plošky	42
Tab. 2.5: Vypočítané hodnoty poměru plocha spoje/objem pájky (S/V)	43
Tab. 2.6: Změřené tloušťky IMC vrstev pro povrchovou úpravu OSP	50

ÚVOD

Diplomová práce pojednává o sledování změn elektrické vodivosti a růstu intermetalické sloučeniny na mezifázovém rozhraní pájeného bezolovnatého spoje během izotermálního stárnutí. Materiálové a procesní vlivy i zrychlené stárnutí výrazně ovlivňují životnost a spolehlivost pájeného spoje. V teoretické části je popsána problematika pájeného spoje, pájecích slitin a dalších vlivů s pájením související. Práce se rovněž zabývá měřením smáčecích charakteristik pomocí metody smáčecích vah. Již zmíněné změny elektrické vodivosti se vyhodnocují na pokusech s navrženou součástkou, resp. jejím simulovaným pouzdrem BGA4 se čtyřmi vývody. Pro bezolovnaté pájení jsou vybrány kulové vývody pájecí slitiny SAC405.

Praktická část diplomové práce je zaměřena na experimenty týkající se izotermálního stárnutí a proudového zatížení. Pro testování byly vybrány dvě povrchové úpravy – OSP a úpravy ENIG (chemický nikl/imersní zlato) z důvodu nejčastějšího použití v průmyslu. Kromě měření elektrické vodivosti se pomocí mikrovýbrusů stárnutých vzorků a optického mikroskopu sleduje růst intermetalické (IMC) vrstvy. Růst IMC vrstvy je možné predikovat matematicky, což je provedeno v závěru práce. Výsledky jsou porovnány s hodnotami naměřenými pomocí mikroskopu.

1 TEORIE PÁJENÉHO SPOJE

1.1 Pájený spoj

Pájení je definováno jako způsob metalurgického spojování dvou kovů třetím kovem nebo slitinou kovů, obecně tedy pájkou. Atomy spojovaných kovů, které jsou na povrchu, se při procesu pájení dostanou do styku s atomy roztavené pájky. Vzdálenosti těchto atomů při pájení jsou dostatečně malé, aby se mohl projevit účinek adhezních (adheze - přilnavost) a kohezních (koheze - soudržnost) sil. Současně se při pájení rozpouštějí a difundují některé prvky spojovaných materiálů. Vzniká tak mezifázové rozhraní mezi pevným kovem a tekutou pájkou. Ve většině případů vznikají přechodové oblasti, tzv. intermetalické vrstvy, o určité tloušťce, které mají odlišné mechanické, chemické a fyzikální vlastnosti než materiály vstupující do procesu pájení. Výsledkem celého procesu je pájený spoj, který má plnit požadovanou funkci, především elektrické a mechanické propojení součástek.

Podle teploty tavení pájky se dělí proces pájení na měkké a tvrdé. Při měkkém pájení je teplota tavení pájky menší než 500 °C. Pokud je teplota tavení pájky vyšší než 500 °C, jedná se o pájení tvrdé. V elektrotechnickém průmyslu se v drtivé většině případů používá pájení měkké.

1.1.1 Požadavky na pájený spoj

1. Mechanická integrita spoje
 - Správný konstrukční návrh spoje
 - Správná volba pájecí slitiny
 - Správný tvar menisků spoje a spoj s minimem dutin
 - Odpovídající pevnost a tažnost spoje
2. Tepelné a elektrické vlastnosti spoje
 - Odpovídající elektrický kontakt
 - Odpovídající tepelný kontakt
3. Metalurgická stabilita
 - Reakční mechanismy mezi spojovanými kovy a pájkou
 - Sledování reakčních mechanismů v samotné pájce během provozu
4. Environmentální trvanlivost
 - Odolnost vůči korozi
 - Odolnost vůči oxidaci spoje
5. Kompatibilita se statutárními požadavky
6. Estetické požadavky [1]

1.1.2 Smáčivost

Smáčivost [5] plochy je vlastnost vyjadřující schopnost vytvořit na jejím povrchu při styku s roztavenou pájkou souvislou vrstvu pájecího materiálu. Pájka musí mít při pájení dobrou vzlínavost a přilnavost, aby se po celém povrchu pájeného materiálu vytvořila tenká a souvislá vrstva. Pro hodnocení smáčivosti povrchu roztavenou pájkou jsou důležité dva hlavní faktory:

- Stupeň smáčivosti, který udává jak daleko se pájka po povrchu rozteče.
- Rychlost smáčení, což je rychlost roztavení a roztečení pájky. Závisí na účinnosti použitého zdroje tepla, typu použitého tavidla a na probíhajících chemických reakcích.

Samotná roztavená pájka má vlastnosti kapaliny, což znamená, že v důsledku malých středních vzdáleností mezi molekulami působí relativně velké přitažlivé síly. Kapalina má tendenci nabývat takového tvaru, aby obsah jejího povrchu byl co nejmenší – při daném objemu má nejmenší obsah povrchu koule, proto se tvoří kapky (deformují se účinkem tíhové síly).

Roztavená pájka se chová, jako by byl její povrch tvořen tenkou, napnutou blánou snažící se neustále o zmenšování svého celkového povrchu. Síla působící v tomto smyslu na délkovou jednotku se nazývá povrchové napětí. Na každou molekulu ležící v povrchové vrstvě kapaliny působí sousední molekuly výslednou přitažlivou silou, která směřuje dovnitř kapaliny a je kolmá na volný povrch.

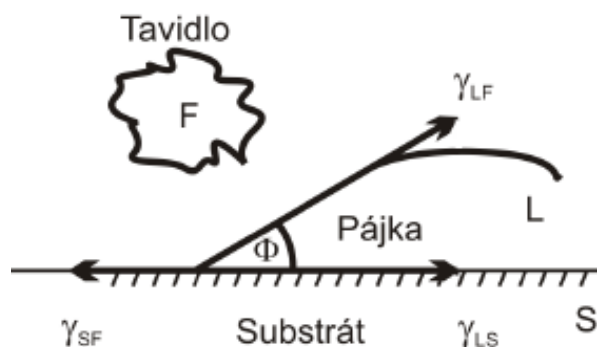
Stupně smáčení mohou být děleny následovně:

- Nesmáčení – V tomto případě se nevytvoří metalurgická vazba a rozhraní mezi pájkou a povrchem zůstane zřetelné. Tavidlo použité k podpoře pájení nemohlo adekvátně odstranit povrchové znečištění [6] nebo je oxidační vrstva příliš silná nebo tavidlo není dostatečně aktivní.
- Smáčení – Povrchová energie čistého kovového povrchu je vyšší než povrchová energie roztavené pájky. Za této podmínky pájka smočí povrch a vytvoří tak na rozhraní metalurgickou vazbu. Jak smáčení postupuje, tak roste na rozhraní tenká mezikovová vrstva a vytváří základ pro spolehlivý spoj.
- Odsmačení – Stav vznikající v případě, že roztavená pájka pokryla povrch a poté ustoupila a zanechala tak kopečky pájky nepravidelného tvaru oddělené oblastmi pokrytými tenkou vrstvou pájky.

Smáčivost je definována pomocí faktoru roztékavosti - tzv. smáčecím úhlem Θ . Rovnováha procesu smáčení je na obr. 1.1. Platí Youngova rovnice

$$\gamma_{SF} = \gamma_{LS} + \gamma_{LF} \cdot \cos \Theta, \quad (1.1)$$

kde γ_{SF} je povrchové napětí na rozhraní pájený povrch/tavidlo/vzduch, γ_{LS} povrchové napětí na rozhraní pájený povrch/pájka a γ_{LF} je povrchové napětí na rozhraní tavidlo/vzduch nebo dusík/pájka.

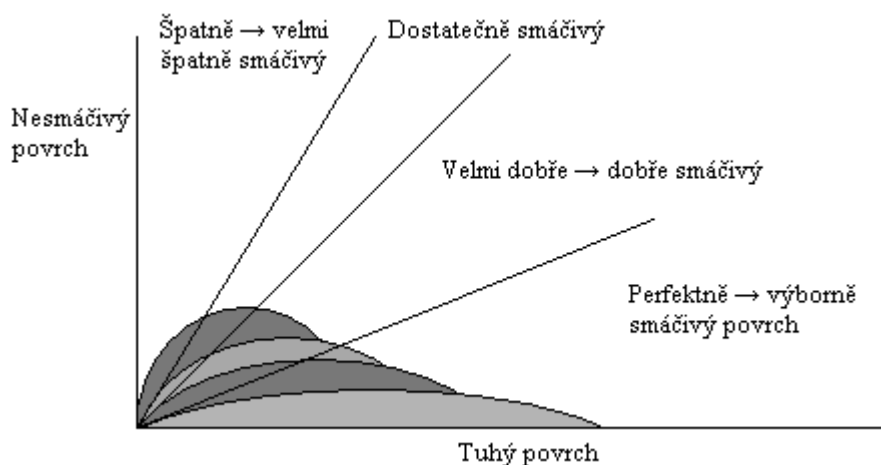


Obr. 1.1: Smáčení povrchu roztavenou pájkou

Smáčivost je ovlivňována kromě typu smáčeného materiálu celou řadou dalších faktorů, jako je například složení pájecí slitiny a obsah nečistot v ní obsažených, drsnost pájených povrchu, stupeň oxidace pájených ploch apod. Hodnocení pájitelnosti povrchu je v tab. 1.1 a graficky znázorněna na obr. 1.2.

Tab. 1.1: Závislost úhlu smáčení na pájitelnosti

Velikost smáčecího úhlu	Hodnocení pájitelnosti
$0^\circ < \Theta \leq 20^\circ$	Výborné až dokonalé smáčení
$20^\circ < \Theta \leq 40^\circ$	Dobré až velmi dobré smáčení
$40^\circ < \Theta \leq 55^\circ$	Postačující smáčení
$55^\circ < \Theta \leq 90^\circ$	Špatné smáčení
$90^\circ < \Theta$	Nesmáčivost



Obr. 1.2: Určení smáčecího úhlu

1.1.3 Metoda smáčecích vah

Jedná se o metodu, využívající velice citlivé mikrováhy měřící sílu působící na vývod součástky, která je ponořena v lázni s roztavenou pájkou. Testovaná součástka je zavěšena na siloměru nad nádobou s roztavenou pájkou, do které se při testu ponoří (obr. 1.3). Zařízení je běžně označováno jako meniskograf. Tento přístroj se skládá

z měřicí hlavy s pružinovými mikrováhami, držáku na uchycení měřeného předmětu, pájecí lázně a elektronické řídicí jednotky [7].



Obr. 1.3: Detailní pohled na zavěšený testovací vzorek v meniskografu

Tato metoda zajišťuje kvantitativní výsledky, které jsou vhodné pro analýzu základních vlastností kontaktů součástek. Stejně jako v ponořovacím testu ji lze použít pro charakteristiku pájitelnosti substrátů. Smáčecí váhy jsou zařízení velmi drahé a pro většinu firem nedostupné. Testování pomocí smáčecích vah je definováno v normách ČSN EN 60068-2-69 ED.2 a ČSN 60068-2-54.

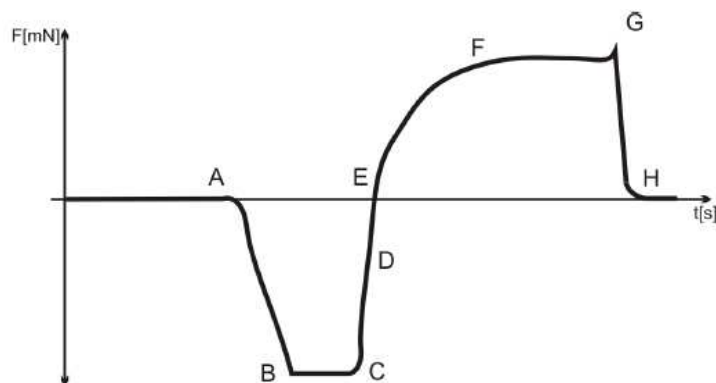
Postup měření

Po nanesení tavidla je testovaný vzorek zavěšen na siloměr nad nádobu s roztavenou pájkou. Se stoupáním nádoby s pájkou se vzorek ponoří do pájky. Zařízení registruje síly působené na měřený prvek. Nádoba s roztavenou pájkou je na zdvihacím mechanismu ovládaném krokovým motorem. Elektronické řízení dovoluje měnit rychlost zdvihu a tím rychlost ponoru. Teplota v lázni je udržována s přesností ± 1 °C. Jelikož všechny pohyby, teploty a čas jsou přesně řízeny a sledovány, je možné všechna měření přesně reprodukovat. Přístroj měří změnu vertikálních složek povrchového napětí během pájení. Rovnováha smáčení vyhodnocuje změnu kontaktního úhlu mezi pájkou a destičkou v čase. Vertikální síly jsou úměrné kosinu úhlu. Tyto síly vyjadřuje rovnice (1.2).

$$F = \gamma \cdot p \cdot \cos \Theta - g \cdot \rho \cdot V, \quad (1.2)$$

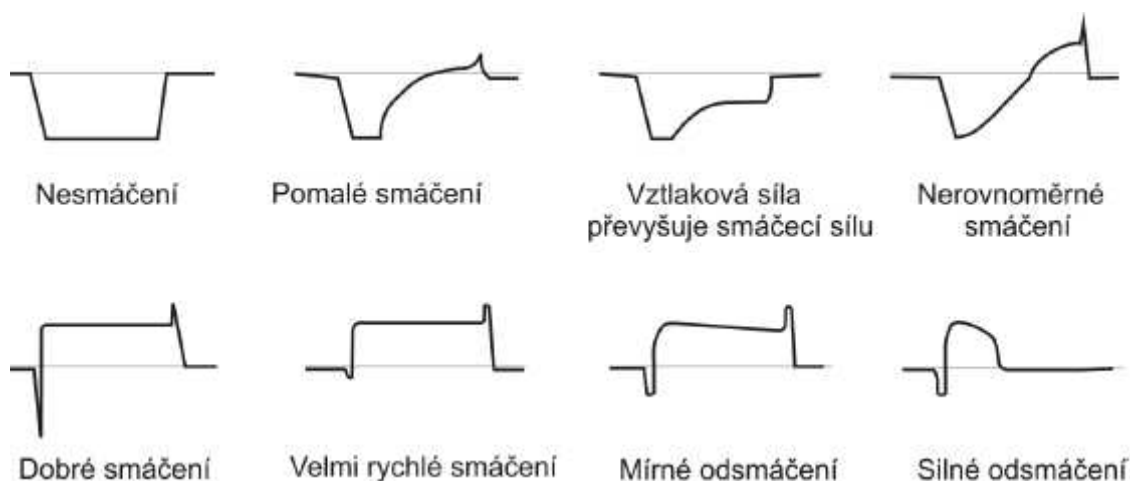
kde F je rovnovážná smáčecí síla, γ je povrchové napětí, p je obvod vzorku, Θ je smáčecí úhel, g je gravitační zrychlení, ρ je hustota pájky a V je objem ponořené části.

Vertikální síla měřená smáčecími vahami se skládá ze dvou sil - vztlakové síly a smáčecí síly. Druhý člen rovnice 1.2 $g \cdot \rho \cdot V$ vyjadřuje velikost vztlakové síly, je určena objemem vytlačené pájky a během testu zůstává konstantní. Smáčecí síla je dána prvním členem rovnice 1.2. Obvod vzorku a povrchové napětí jsou během testu konstantní, mění se pouze kontaktní úhel.



Obr. 1.4: Obecná smáčecí charakteristika (převzato z [8])

Na obr. 1.4 je zobrazena obecná křivka smáčení. Počátek styku vzorku s pájkou je označen bodem A. Teplota vzorku je příliš nízká k podpoře smáčení a musí být vtlačován velkou silou. Sklon křivky mezi A a B je dán rychlostí, jakou je vzorek ponořován. V bodě C pájka začíná smáčet vzorek. Nastává změna působící síly do bodu F. Pájka nejprve vytlačuje vzorek směrem vzhůru, s postupujícím smáčením ho však začne povrchové napětí táhnout dolů do nádoby a je nutné vyvinout určitou sílu na jeho vytažení - křivka D až F. Bod D je okamžik, kdy je povrch pájky kolmý k povrchu vzorku. Síla v bodě D je rovna vztlakové síle a je možné ji vypočítat z rozměrů vzorku, hloubky ponoru a měrné hmotnosti pájky. V bodě E jsou síly působící na vzorek v rovnováze a výsledná síla je nulová. Časový interval B až C je dán tepelnou kapacitou vzorku a rychlostí přestupu tepla mezi pájkou a vzorkem. Tvar křivky C a F je dán rychlostí smáčení a má rozhodující význam pro určení kvality smáčitelnosti. Bod G je vrchol křivky a určuje, kdy došlo k úplnému vytažení vzorku z lázně, H je konečný stav. Tímto měřením jsme schopni velmi přesně stanovit smáčitelnost a rovněž i vliv dalších činitelů. Na obr. 1.5 jsou vidět příklady smáčecích charakteristik pro konkrétní případy.



Obr. 1.5: Možné průběhy časové závislosti smáčecí síly (převzato z [8])

Pro porovnání výsledků měření na meniskografu se používá poměr parametrů F_2 a $t_{2/3}$. F_2 je maximální smáčecí síla a $t_{2/3}$ je čas, kdy smáčecí síla dosáhne 2/3 maximální síly. Vzorky s nejlepší smáčivostí mají vysokou hodnotu tohoto poměru, tzn. že hodnota síly F_2 by měla být vysoká a hodnota času $t_{2/3}$ malá.

1.1.4 Intermetalické vrstvy

Intermetalická vrstva (IMC – InterMetallic Compound) [2] je homogenní chemická sloučenina tvořená ze dvou nebo více kovů. Tyto vrstvy se vyskytují na rozhraní mezi materiálem substrátu a pájecí slitinou a výrazně ovlivňují spolehlivost pájeného spoje. Na straně jedné zajišťují vyšší pevnostní charakteristiky formovaného spoje, na straně druhé jsou intermetalické vrstvy podstatně křehčí než pájka i základní materiál a tím redukuje životnost pájeného spoje (další vlastnosti IMC sloučenin jsou v tab. 1.2). V případě použití bezolovnaté pájky s převahou Sn a Cu základního materiálu, dojde k vytvoření intermetalických slitin Cu_6Sn_5 (teplota tavení 415 °C) a Cu_3Sn (teplota tavení 670 °C). Po ztuhnutí pájky se zastaví vytváření intermetalické vrstvy mechanismem rozpouštění a pokračuje mechanismem difúze v pevné fázi - difúze je výrazně větší při zvýšených teplotách.

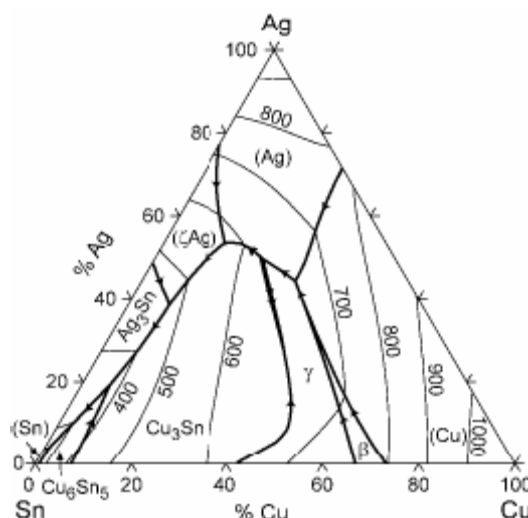
Fáze Cu_6Sn_5 vzniká při teplotě 186 °C a má formu krystalů, které vytvářejí souvislý povlak. Tato fáze na rozdíl od Cu_3Sn je nepájitelná a je zdrojem obtíží se smáčivostí povrchu. Pokud tato fáze vznikne, má tendenci se zvětšovat i za pokojové teploty a může podstatně zhoršit pájitelnost. Pokud je pájený spoj vystaven při provozu vyšším teplotám, rychlost růstu této intermetalické fáze se také zvyšuje [2]. Opatřením může být zvětšení vrstvy pájky na tloušťku minimálně 3 μm , aby vrstva nepronikla na povrch. Pájitelností rozumíme schopnost materiálu být smáčen při určité teplotě a za určitou dobu roztavenou pájkou.

Vznik různých intermetalických sloučenin se odvíjí od použitých materiálů v procesu pájení. V následující tabulce 1.2 jsou uvedeny možnosti vzniku jednotlivých intermetalických sloučenin jak v samotné pájce, tak i na podkladové měděné vrstvě v závislosti na použité pájecí slitině.

Tab. 1.2: Možné intermetalické sloučeniny pro různé pájky (převzato z [3])

Slitina pájky	IMC v pájce	IMC na měděném podkladu
Sn-3,5Ag	Ag_3Sn	Cu_6Sn_5 , Cu_3Sn
Sn-3,4Ag-0,8Cu	Ag_3Sn , Cu_6Sn_5 , Cu_3Sn	Cu_6Sn_5 , Cu_3Sn
Sn-3Ag-1Bi-0,5Cu	Ag_3Sn , Cu_6Sn_5 , Cu_3Sn	Cu_6Sn_5 , Cu_3Sn
Sn-3Ag-3Bi	Ag_3Sn	Cu_6Sn_5 , Cu_3Sn
Sn-0,7Cu	Cu_6Sn_5 , Cu_3Sn	Cu_6Sn_5 , Cu_3Sn
Sn-9Zn	-	CuZn , Cu_5Zn_8 , Cu_6Sn_5 , Cu_3Sn
Sn-8Zn-3Bi	-	CuZn , Cu_5Zn_8 , Cu_6Sn_5 , Cu_3Sn
Bi-43Sn	-	Cu_6Sn_5 , Cu_3Sn , Cu-Sn-Bi
Bi-42Sn-0,5Ag	Ag_3Sn	Cu_6Sn_5 , Cu_3Sn , Cu-Sn-Bi
Sn-5Sb	Sb_2Sn_3	Cu_6Sn_5 , Cu_3Sn
In-48Sn	-	Cu_6Sn_5 , Cu_3Sn , Cu-In-Sn

Sloučenina intermetalické fáze vzniká v souladu nastavení poměru kovů v pájecí slitině. Závislost vzniku intermetalických sloučenin na složení pájky je znázorněna na obr. 1.6.



Obr. 1.6: Vznik intermetalických sloučenin v závislosti na složení pájecí slitiny (převzato z [4])

Tab. 1.3: Vlastnosti intermetalických sloučenin [18]

Vlastnost		Cu ₆ Sn ₅	Cu ₃ Sn	Ni ₃ Sn ₄	Cu
Tvrdost (Vickers)	(kg mm ²)	378 (± 55)	343 (± 47)	365 (± 7)	50
Mechanický charakter	(-)	Křehká	Křehká	Křehká	Tvárná
Teplotní roztažnost	(ppm K)	16,3	19,0	13,7	16,0
Tepelná vodivost	(W mK ⁻¹)	34,1	70,4	19,6	385,0
Měrná rezistivita	(μΩ cm)	17,5	8,9	28,5	1,7

1.1.5 Mikrovýbrus

Strukturu pájeného spoje pozorujeme zpravidla na mikrovýbrusu pomocí elektronového nebo optického mikroskopu. Rovněž je důležitý při analyzování vad.

Postup při zalévání vzorku a přípravě mikrovýbrusu

1. Oddělení např. lupénkovou pilkou sledovanou část DPS.
2. Nanesení tenké vrstvy separátoru na dno a stěny zalévací formy.
3. Smíchání složek dentacrylu (dvousložková pryskyřice) v odpovídajícím poměru v homogenizační nádobě.
4. Upevnění vzorku do zalévací formy (nejčastěji kolmo ke dnu nádoby) a zalití dentacrylem.

5. Nastává polymerace. Tento proces trvá několik hodin při pokojové teplotě. Po vytvrzení hmoty se vzorek vyjme z formy a opláchne vlažnou vodou.
6. Pomocí brusné jednotky a pod malým proudem tekoucí vody se provádí broušení vzorku na hrubozrnném papíru typ 220 a následně na jemnozrnném papíru typ 600 a nakonec pomocí typu 1200 (experimentálně bylo zjištěno, že je vhodné použít ještě čtvrtý brusný papír typu 4000). Při poslední fázi broušení je důležitý optimální přtlak, aby nebyly vytvořeny ve vzorku hluboké rýhy, které by se obtížněji přelešťovaly.
7. Leštění se provádí na plstěném kotouči pomocí diamantových leštících past různé zrnitosti a IPA.
8. Čištění mikrovýbrusu se provádí v deionizované vodě s ultrazvukem.
9. Před pozorováním optickým mikroskopem je možné selektivními leptacími roztoky zvýraznit některé oblasti.

1.2 Spolehlivost pájeného spoje

Spolehlivý pájený spoj je jedním z hlavních požadavků v elektrotechnickém průmyslu. Z funkčního hlediska je hlavním parametrem doba života spoje, po který je zaručena správná funkce pájeného spoje. Životnost většiny výrobků se pohybuje v rozsahu několika let. Již v minulosti se u klasických součástek zjišťovala pomocí takzvaných zrychlených zkoušek. Jedná se o simulaci pracovního režimu výrobku za ztížených podmínek (například zvýšené provozní teploty, střídání kladných a záporných teplot a také zvýšené relativní vlhkosti). Tyto podmínky urychlují stárnutí a degradaci a dochází k stimulaci vnitřních jevů v pájených spojkách. Jedná se především o fyzikální procesy difúze a elektrochemický proces koroze. Difúze materiálů se projevuje již zmíněným vznikem intermetalických sloučenin a jejich neustálým nárůstem. Vzhledem k tomu, že tyto vrstvy vykazují zhoršené elektrické a mechanické vlastnosti, především sníženou elektrickou vodivost a křehkost, vede tento proces k degradaci, a postupně k nefunkčnosti spoje. Elektrochemická koroze mění vlastnosti materiálů spoje, především narušuje jeho homogenitu, zhoršuje adhezi a rovněž vede k jeho destrukci. Sleduje se elektrická vodivost spojů, jejich vzhled a mechanická pevnost pravidelně po uplynutí určité doby, což se vyhodnocuje obvykle pomocí statistických metod. Ta je ovlivněna několika faktory a mezi hlavní patří:

- stárnutí materiálů
- mechanické namáhání
- tepelné namáhání
- proudové namáhání

Vlastnosti pájeného spoje jsou samozřejmě také ovlivněny použitou pájkou, tavidlem a samotným procesem pájení. Ideální pájený spoj je charakterizován konkávním pájecím kuželem, lesklým a hladkým povrchem pájky s dokonale smočeným vývodem součástky i pájecí ploškou. Takový spoj by měl mít i dostatečnou mechanickou pevnost [1].

1.2.1 Stárnutí materiálů

Stárnutí materiálů je ovlivněno zejména tvorbou difúzní vrstvy, která se tvoří na rozhraní mědi a cínu. Stárnutím také dochází k tvorbě oxidů a dalších adsorpčních vrstev na povrchu materiálu. Difúzní vrstva potvrzuje, že došlo k vytvoření pájeného spoje. Negativní stránkou této vrstvy je zhoršení vlastností spoje - především zvýšení odporu. Difúzní vrstva je tvořena intermetalickými sloučeninami, které s postupem času narůstají - zvyšuje se jejich tloušťka, což je výrazně urychleno při zvýšené teplotě. Běžně se tloušťky difúzních vrstev pohybují řádově v mikrometrech, ale mohou dosahovat i několik desítek mikrometrů. V takovém případě už může pájený spoj ztrácet své mechanické a elektrické vlastnosti. Rychlost růstu intermetalické vrstvy v teplotní závislosti [19], [28] lze popsat rovnicí (1.3)

$$w(t) = w_0 + A \cdot t^n \cdot \exp\left(-\frac{Q}{R \cdot T}\right), \quad (1.3)$$

kde $w(t)$ – celková tloušťka IMC vrstvy za dobu t (μm),

w_0 – počáteční tloušťka (μm),

A – konstanta (m s^{-1}),

n – časový exponent rychlosti růstu (-),

Q – aktivační energie pro růst IMC vrstvy (J mol^{-1}),

R – univerzální plynová konstanta $8,314 \text{ (J mol}^{-1} \text{ K}^{-1}\text{)}$,

T – teplota stárnutí (K).

Pro růst IMC, který je řízený difúzí se používá předpoklad $n = 0,5$, tj. pro případy SAC pájka / Sn povlak a SAC pájka / Cu.

1.2.2 Mechanické namáhání

Mechanické namáhání způsobuje únavu materiálu, která se projeví snížením mechanických vlastností a případným mechanickým narušením. Rozdílné délkové roztažnosti mají za následek mechanické namáhání při změně teploty. Mechanické namáhání může být děleno podle působení na pájený spoj:

- interní – spoj je namáhán v důsledku vnitřních změn, např. tepelným namáháním
- externí – spoj je namáhán vnějšími silami (vibrace, ohyb)

K internímu mechanickému namáhání řadíme také creepovou únavu materiálu způsobenou dlouhodobě zvýšenou teplotou (nad $20 \text{ }^\circ\text{C}$) a vlhkostí okolního prostředí (nad 50%). Mechanické namáhání způsobuje únavu materiálu spoje, která se následně projeví snížením jeho mechanických vlastností a následným mechanickým narušením.

1.2.3 Tepelné namáhání

Tepelné namáhání je důsledkem tepla působícího na pájený spoj. Může být způsobeno vlivem okolí nebo vzniká v samotném obvodu jako vedlejší produkt v důsledku vyzařovaného ztrátového výkonu. Působení tepla vyvolává buď nevratné děje (změna struktury, difúze), nebo vratné děje (změny rozměrů, ohyb) [5].

1.2.4 Proudové namáhání

Průchod elektrického proudu pájeným spojem způsobuje ve většině případů urychlení jevu stárnutí materiálů především vlivem ztrátového výkonu přeměněného na tepelnou energii. Pokud je ale proudová hustota v pájeném spoji extrémně vysoká (nad 10^4 A cm^{-2}), může dojít vlivem srážek elektronů k jeho degradaci.

1.3 Povrchové úpravy

1.3.1 OSP

Jedná se o chemickou metodu nanášení organických inhibitorů oxidace mědi na odhalený měděný povrch DPS, zpravidla po tisku nepájivé masky, který reakcí s mědí vytvoří organometalickou vrstvu. Před samotným nanesením ochranné vrstvy OSP se působením ultrazvuku zbaví povrch desek prachových částic vzniklých při formátování a desky pak postupují do čistícího a zaleptávacího modulu, kde dojde k mikrozaleptání a vyčištění pájecích ploch. Po průchodu oplachovým modulem se desky ponoří do lázně OSP. Organický povlak se vytváří pouze na měděných plochách a zabraňuje oxidaci čerstvě zaleptaného povrchu mědi. Po průchodu oplachovým modulem, je deska horkovzdušně sušena a zabalena. OSP chrání pájecí plochy před oxidací po dobu asi půl roku v závislosti na skladovacích podmínkách. V OSP lázni se často používají látky na bázi benzoimidazolů.

Vrstva OSP je na povrch mědi fixována slabými Van der Waalsovými silami. Tato vrstva je velmi tenká a je téměř neviditelná.

Výhody OSP:

- nízké procesní náklady
- bezproblémová kompatibilita součástek
- bezproblémové osazování

Nevýhody OSP:

- kratší doba skladovatelnosti DPS
- náchylná k poškození
- měnící se vlastnosti po průchodu přetavovací pecí

1.3.2 Chemický nikl / imersní zlato (Ni/Au)

Tato úprava je rovněž známá pod anglickou zkratkou ENIG (Electroless Nickel / Immersion Gold). V této práci bude dále používáno označení Ni/Au.

Při této povrchové úpravě dochází k chemickému nebo galvanickému nanesení vrstvy niklu na měděný povrch. Poté se nanese tenká ochranná vrstva zlata. Charakteristické vlastnosti niklu (tvrdost, pájitelnost a stejnoměrnost povrchu) činí z tohoto typu povrchové úpravy výbornou alternativu pro použití v širokém spektru elektrotechnických aplikací. Tenká vrstva imersního zlata zajišťuje dobrou pájitelnost povrchu a ochranu vysoce aktivního niklu před oxidací. Ni/Au povrchy mohou beze ztráty pájitelnosti přestát šest i více teplotních cyklů. Šířka vrstvy niklu je zpravidla

3 - 5 μm a šířka vrstvy zlata je zpravidla 0,05 - 0,2 μm v závislosti na technologickém postupu nanášení. Tento povrch je také kompatibilní s kontaktováním Al drátů. Skladovatelnost DPS s povrchovou úpravou Ni/Au je podstatně vyšší nežli v případě povrchové úpravy OSP a dosahuje až dvou let.

Výhody Ni/Au:

- možnost kontaktování
- rovnost povrchu
- delší skladovatelnost DPS

Nevýhody Ni/Au:

- u silnějších vrstev Au difúze zlata z povrchu DPS do spoje
- náročnější technologický proces
- vyšší cena

1.4 Tavidla

Tavidla pomáhají za působení tepla odstranit z povrchu pájeného materiálu oxidy, nečistoty a chrání jej i proti oxidaci během procesu pájení. Reakce tavidla s oxidy zapříčiní zvýšení povrchového napětí pájeného povrchu a tím zlepšení smáčivosti. Přísady, pomocí kterých dosahujeme dobrých pájecích výsledků, se nazývají aktivátory.

Funkce tavidla:

- Tavidlo za spolupůsobení tepla napomáhá fyzikálně i chemicky k vytvoření spolehlivého pájeného spoje, reaguje s oxidy a nečistotami na spojovaném povrchu i pájce a brání reoxidaci povrchů
- Odstraňuje reakční produkty z pájeného povrchu a umožňuje pájce dostat se do pracovní vzdálenosti s kovovými povrchy
- Snižuje povrchové napětí pájecí slitiny a zvyšuje povrchové napětí pájeného povrchu, umožní tak pájce, aby se dobře roztekla.
- Zlepšuje přenos tepla od tepelného zdroje k pájenému místu

Pro bezolovnaté pájení s vyššími pracovními teplotami dochází k zásahům do formulace zejména bezoplachových tavidel, která mají malé "technologické okno" - úpravy aktivačních teplot i časů. Všeobecně se používají stejné typy tavidel jako u olovnatých pájek. Preferují se bezoplachová tavidla (No Clean - NC) na bázi pryskyřic - ekologické i ekonomické důvody.

Tavidla musí splňovat následující kritéria:

- Musí vyhovovat zákonům a musí být neškodná pro životní prostředí
- Musí být zajištěna kompatibilita se všemi používanými materiály
- Musí být dostupná

Obecně se tedy doporučují tavidla bez organických látek tzv. VOC-free. VOC - Volatile Organic Compounds, nebo-li nestálé organické složky, které se vypařují při nízkých teplotách a mohou unikat do atmosféry. Tato tavidla jsou nehořlavá, mají menší

vypařování a jsou méně nebezpečná než alkohol. Na druhou stranu tavidla obsahují vodu a mohou tedy zmrznout. Rovněž mají větší povrchové napětí.

1.4.1 Ecofrec TF40

Jedná se o bezoplachovou tavnou pastu pro opravy a pájení klasických a SMD součástek na desce plošných spojů. Tato pasta má vysokou viskozitu a je vyrobena ze směsi pryskyřic a aktivátorů. Po zapájení jsou zbytky tavidla na desce neagresivní a nezaněchávají viditelné zbytky, takže nemusí být čištěna. Nanáší se pomocí dávkovače nebo tiskem přes šablonu. Lepivost tavidla zaručuje, že součástky se udrží na místě před přetavením [17].

1.4.2 TSF 6592

Pastovité tavidlo TSF 6592 od firmy Litton Kester je bezoplachové. Bylo navrženo pro bezolovnaté technologie pájení, hlavně se používá pro flip chip aplikace, ball attach, opravy CSP, BGA a SMD. Je ovšem vhodné pro jakékoli aplikace bezolovnatého pájení. Skládá se z kalafuny, terpineolu a malého množství kyseliny jantarové [16].

1.5 Bezolovnaté pájecí slitiny

Pájený spoj je tvořen přibližně 75 % pájky, zbylých 25 % tvoří povrch pájecí plochy a vývod součástky. Z toho lze usoudit, že pájka je v procesu pájení základní součástí, a proto musí být jejímu výběru věnována nejvyšší pozornost. Od roku 2006 je až na výjimky zakázáno používat olovnaté pájky ve výrobním procesu z důvodu jejich vysoké toxicity.

V elektrotechnice se využívá více druhu slitin bezolovnatých pájek. Mezi nejčastěji používané slitiny pájek patří SAC (Sn – Ag – Cu), SC (Sn – Cu), SA (Sn – Ag). Perspektivní slitinou se jeví také SCNi (Sn – Cu – Ni), tato slitina se řadí pod slitiny SC, protože zastoupení niklu v pájce je minimální.

Cín zůstává i nadále klíčovou složkou, další složky jako bismut, stříbro nebo indium tvoří pouze malou část slitiny, poslední dva hlavně kvůli jejich vysoké ceně. Kadmium je vyloučeno z důvodu jeho toxicity. Antimon je také toxický, ale méně než olovo a kadmium. Používá se tedy pouze jako minimální součást slitiny.

1.5.1 Pájecí slitiny SAC

SAC slitiny obsahují prvky cín (Sn), stříbro (Ag) a měď (Cu). Několik těchto slitin dosahuje eutektického stavu, který vzniká díky přesnému poměru jednotlivých složek, díky tomu mají nižší eutektickou teplotu tání, u SnAgCu je to 217 °C. Tyto slitiny se v porovnání s olovnatou pájkou nabízí jako nejvhodnější do budoucna. Díky vyšším teplotám tání slitiny SnAgCu, je tato slitina vhodnější při vyšších provozních teplotách než SnPb. Při smáčení mědi SnAgCu pájkou se měď nesmáčí tak dobře, jak olovnaté pájky. Velmi často používanou slitinou je pájka s označením SAC 305, která obsahuje 96,5 % cínu, 3 % stříbra a 0,5 % mědi. Na trhu jsou však i pájky s jiným poměrem složení například SnAg4Cu0.5, SnAg3.8Cu0.7, SnAg3.7Cu1.3, SnAg4Cu1, SnAg3.2Cu0.5, SnAg4.7Cu1.7.

1.5.2 Pájecí slitiny SC

Jedná se o slitinu cínu a mědi. Nejčastěji používaná slitina pájek SC je při složení 99,3 % cínu a 0,7 % mědi. Eutektická teplota tavení SC pájek je 227 °C. Tato teplota je nižší pouze o 5 °C než teplota tavení cínu.

Odklon od základní eutektické slitiny cín/měď byl způsoben nepříjemným množstvím můstků a zkratů při pájení za normálních podmínek. Zejména tvorbu můstků se nepodařilo odstranit přenastavením parametrů procesu, tj. použitím aktivnějších tavidel, nižší rychlostí procesu atd.

V zájmu zachování všech výhod výrobního procesu pro elektronický průmysl při současné eliminaci olova byla vyvinuta řada bezolovnatých pájek SN100C. Inovativní stabilizovaná pájka cín/měď SN100C má přijatelnou teplotu zpracování (250 °C - 260 °C) při pájení vlnou, což eliminuje nebezpečí tepelného poškození desek plošných spojů a součástek. SN100C je pájka prvotřídních vlastností a přináší ekologické výhody spojené s bezolovnatou technologií.

SN100C je ideální pro sofistikované procesy včetně pájení vlnou, aplikace ponorem a galvanické aplikace. Unikátní stabilizace procesu použitím niklu (0,05 %) má velmi pozitivní vliv na chování pájky při tuhnutí. Vytváření jehlových krystalů je zpomaleno a vytváří se více sférické struktury. To výrazně zlepšuje tok pájky na přechodu pájecí plochy a vlny a působí proti vytváření můstků pájky. Výsledkem je jednolitá struktura s lesklým povrchem. Navíc SN100C poskytuje vynikající tepelnou a elektrickou vodivost doprovázenou sníženou mírou přechodu mědi do pájecí lázně ve srovnání se slitinami SAC. Pájka SN100C také nabízí výhody z hlediska ceny ve srovnání se slitinami obsahujícími stříbro [9].

Jestliže je do pájky SN100C přidán fosfor, působí jako velice účinný antioxidant, fosfor ovšem může snižovat smáčivost pájky, což je vzhledem k jeho nízké koncentraci zanedbatelné. Porovnání základních parametrů pro pájecí slitiny SAC305 a SN100C je uvedeno v tabulce 1.4.

Tab. 1.4: Fyzikální vlastnosti pájky SAC305 [10] a SN100C [11]

Pájka	Teplota tavení	Hustota	Rezistivita	Tažnost	Pevnost
	(°C)	(g cm ⁻³)	(μΩ m)	(%)	(MPa)
SAC305	217	7,37	0,15	27	52
SN100C	227	7,4	0,13	48	32

1.6 Procesní faktory u pájení přetavením

Teplotním profilem pro proces pájení se rozumí závislost teploty na čase, měřená na montážním celku v průběhu přetavení. Tento teplotní profil musí být volen tak, aby byla dosažena kvalitní produkce a minimalizované možné defekty výrobního procesu. Sledování teplotní závislosti je důležité nejen při pájení přetavením, ale také při pájení vlnou nebo při vytvrzování lepidla. Teplotní profil je velice důležitý parametr a je nutné jej optimalizovat nejen v závislosti na druhu pájení, ale také s ohledem na typ montážního celku.

Parametry montážního celku, ovlivňující teplotní profil:

- Hustota osazení DPS
- Hmotnost DPS
- Umístění a druh součástek
- Tepelná vodivost DPS, použitý materiál
- Tepelná kapacita DPS
- Typ DPS: jednostranná, oboustranná nebo vícevrstvá deska

Volba teplotního profilu je závislá mimo jiné také na typu použité pájky. Jedná se o materiály chemicky odlišné, s čímž souvisí také teploty tavení jejich eutektických slitin.

Důležité parametry teplotního profilu:

- Gradient nárůstu teploty
- Vrcholová (maximální) teplota T_p
- Prodleva nad liquidem (TAL)
- Gradient chlazení

Neméně důležitým parametrem je integrál dodané energie Q_h . Postup výpočtu integrálu dodané energie je popsán v kapitole 2.4.1.

1.7 Elektrická vodivost pájeného spoje

Základním kvalitativním požadavkem pájeného spoje je jeho dobrá elektrická vodivost [12] po celou dobu životnosti spoje. Samotnou vodivost spoje ovlivňují především materiály tvořící pájený spoj a také technologický proces tvorby pájeného spoje. Významný podíl na negativním ovlivnění elektrické vodivosti pájeného spoje mají intermetalické sloučeniny na rozhraní pájeného povrchu a pájky viz. kapitola 1.1.4. Tyto sloučeniny se tvoří především v průběhu samotného přetavení pájky, a pokud vzniknou, mají tendenci s časem růst a tím negativně ovlivňovat elektrické a mechanické charakteristiky pájených spojů. Typickými vlastnostmi těchto sloučenin je křehkost, nesmáčivost a nízká elektrická vodivost.

Elektrická vodivost G je převrácenou hodnotou elektrického odporu R a lze ji vypočítat ze vztahu

$$G = \frac{1}{R} \quad (1.3)$$

Jestliže jsou známy rozměry měřeného bloku a také jeho přesné složení, je možné vypočítat elektrickou vodivost G ze závislosti na rozměrech a měrné elektrické vodivosti látky podle vzorce

$$G = \gamma \cdot \frac{S}{l}, \quad (1.4)$$

kde γ je měrná elektrická vodivost látky, S obsah kolmého průřezu a l je délka měřeného bloku. Ze vzorce 1.4 tedy vyplývá, že elektrická vodivost G je přímo úměrná měrné elektrické vodivosti γ a tedy že je do značné míry závislá na materiálech tvořící pájený spoj. V tabulce 1.5 jsou uvedeny konduktivity vybraných, nejčastěji používaných kovů v elektrotechnice.

Z tabulky 1.5 je patrné, že rozdíl měrné elektrické vodivosti mezi mědí a cínem je téměř jeden řád. Z toho plyne, že pájený spoj, ve kterém je většinové zastoupení cínu, musí být dimenzován na řádově větší průřez než je průřez měděného vodiče například na DPS, aby se zajistila dostatečná elektrická vodivost celé pájené soustavy a nedocházelo k nadměrnému namáhání spoje.

Tab. 1.5: Přehled elektrické vodivosti při 0 °C pro vybrané materiály [13]

Materiál	Značka	Elektrická vodivost G
		(10^6 S m^{-1})
Cín	Sn	5,9
Měď	Cu	56,0
Hliník	Al	37,0
Olovo	Pb	4,8
Platina	Pt	9,5
Stříbro	Ag	63,0

1.7.1 Teplotní vliv na vodivost pájeného spoje

Při návrhu elektrických obvodů by měla být brána v potaz také provozní teplota elektronických zařízení včetně pájených spojů, jelikož teplota nepřímo úměrně ovlivňuje elektrickou vodivost spojů. Každý vodič má takzvaný teplotní součinitel elektrického odporu α_R , který vyjadřuje závislost elektrického odporu/vodivosti v závislosti na teplotě. V tabulce 1.6 je stručný přehled některých kovů a jejich teplotních součinitelů elektrického odporu.

Elektrickou vodivost G při určité teplotě je možné vyjádřit vztahem 1.5, jestliže je známa počáteční vodivost G_0 , teplotní součinitel vodiče α a rozdíl teplot ΔT .

$$G = \frac{G_0}{1 + \alpha \cdot \Delta T} \quad (1.5)$$

Z tabulky 1.6 je zřejmé, že elektrická vodivost většiny kovů je závislá na jejich teplotě. Například kovy, jejichž teplotní součinitel elektrického odporu α_R je přibližně roven hodnotě $4 \cdot 10^{-3} \text{ K}^{-1}$ vykazují pokles elektrické vodivosti o 10 % při zvýšení teploty o 25 °C. Tato závislost může způsobovat problémy v některých elektronických zařízeních, u kterých je definována elektrická vodivost spojů a každá změna způsobuje odchylky od regulérní funkce zařízení. Například u analogově-digitálních převodníků se tyto změny projeví odlišnými převodními charakteristikami těchto zařízení.

Tab. 1.6: Přehled teplotních součinitelů pro vybrané materiály [13]

Materiál	Značka	Teplovní součinitel el. odporu α_R
		(10^{-3} K^{-1})
Cín	Sn	4,7
Hliník	Al	4,0
Měď	Cu	4,0
Olovo	Pb	3,9
Nikl	Ni	5,8
Platina	Pt	3,6
Stříbro	Ag	3,8
Zinek	Zn	3,8

1.7.2 Vliv složení pájeného spoje na elektrickou vodivost

Elektrickou vodivost [12] pájeného spoje ovlivňuje také složení samotné pájecí slitiny. Pro srovnání jsou v tabulce 1.6 uvedeny elektrické vodivosti SnPb pájky ve srovnání s procentuálním zastoupením jejich prvků v objemu pájky.

Tab. 1.7: Vliv poměru cínu a olova v pájce na elektrickou vodivost [14]

Cín	Olovo	Elektrická vodivost G
(%)	(%)	(% IACS)
10	90	8,2
20	80	8,7
30	70	9,3
50	50	10,9
60	40	11,5
70	30	12,5
80	20	13,8
100	0	15,6

Hodnoty elektrické vodivosti vybraných bezolovnatých pájecích slitin Sn-Ag-Cu jsou uvedeny v tab. 1.8. Pro srovnání lze doplnit hodnotu poměrně často používané slitiny SN100C, která činí 13 % IACS. Protože zapájený spoj obsahuje i intermetalické vrstvy, je vhodné také uvést jejich hodnoty elektrické vodivosti (viz. tab. 1.9).

Tab. 1.8: Elektrická vodivost pro různý poměr složení Sn-Ag-Cu pájecí slitiny [14], [15], [20]

Sn	Ag	Cu	Elektrická vodivost G
(%)	(%)	(%)	(% IACS)
96,5	3,0	0,5	16,6
95,8	3,5	0,7	13,0
95,5	3,8	0,7	13,2
96,5	3,5	-	16,0
95,0	5,0	-	12,6

V tabulkách 1.7 a 1.8 jsou elektrické vodivosti uvedeny ve tvaru procentuálního poměru k IACS. IACS je standardizovaná konstanta, udávající elektrickou vodivost měkké mědi a její hodnota činí $58 \cdot 10^6 \text{ S m}^{-1}$.

Tab. 1.9: Porovnání elektrické vodivosti intermetalických vrstev s mědí

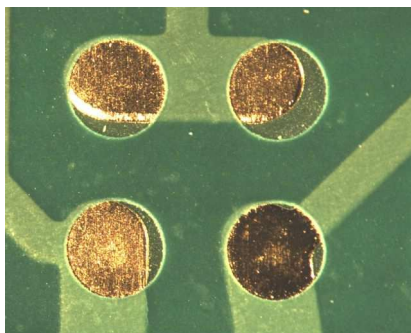
Pájka	Elektrická vodivost G
	(10^6 S)
Cu	58,8
Cu ₃ Sn	11,2
Cu ₆ Sn ₅	5,7

2 PRAKTICKÁ ČÁST

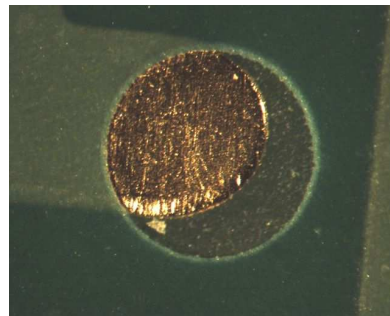
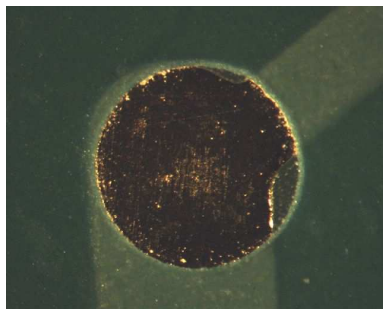
Předmětem praktické části bylo vyrobit testovací DPS a podrobit je izotermálnímu stárnutí. Ve zvolených časech byly u jednotlivých vzorků proměřeny vodivosti zapájených plošných spojů. Pro některé časy byly vytvořeny mikrovýbrusy pro pozorování mikroskopem.

2.1 Návrh testovací DPS

Pro samotné měření elektrické vodivosti pájených spojů bylo nutné navrhnout novou testovací DPS. Dříve vyrobené DPS nebyly vhodné. Důvodem byly pájecí plošky pro testovací součástku BGA4. Nebyly stejné, jejich tvar nebyl kruhový a nebylo tedy možné přesně definovat plochu pájeného spoje (viz obr. 2.1 a obr. 2.2).



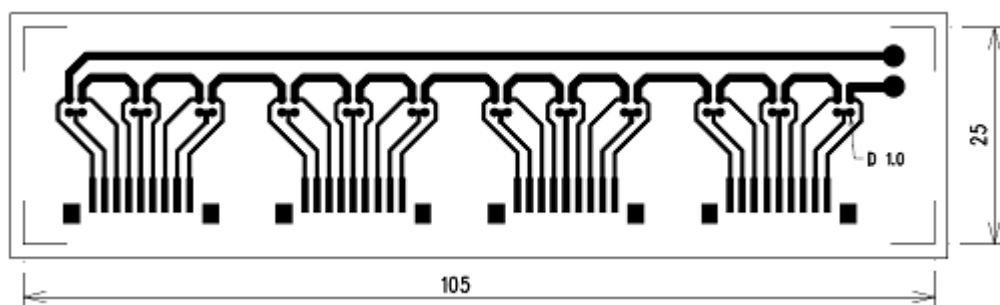
Obr. 2.1: Pájecí plošky staré testovací DPS (zvětšeno 40x)



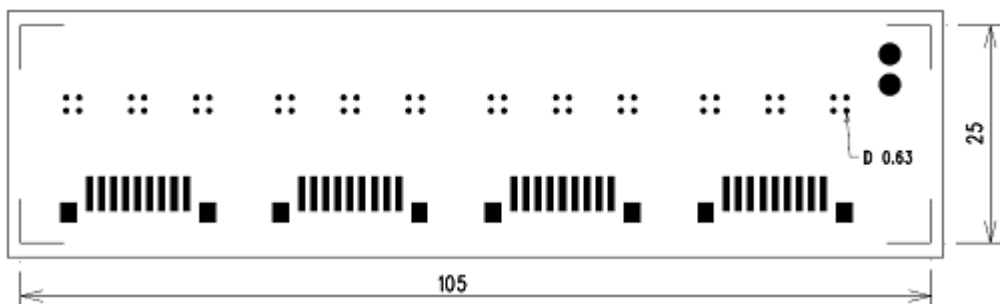
Obr. 2.2: Detaily pájecích plošek staré testovací DPS (zvětšeno 90x)

Z těchto důvodů byla navržena nová testovací DPS. Na obrázku 2.3 je vodivý motiv a na obrázku 2.4 je předloha pro nepájivou masku. Stejně tak na obr. 2.5 a 2.6 je vodivý motiv a nepájivá maska pro testovací součástku BGA4. Pro návrh pájecích plošek byl zvolen odlišný přístup. Rozměry a tedy i plocha pájecí plošky jsou přesně definovány nepájivou maskou (Solder Mask Defined Pad).

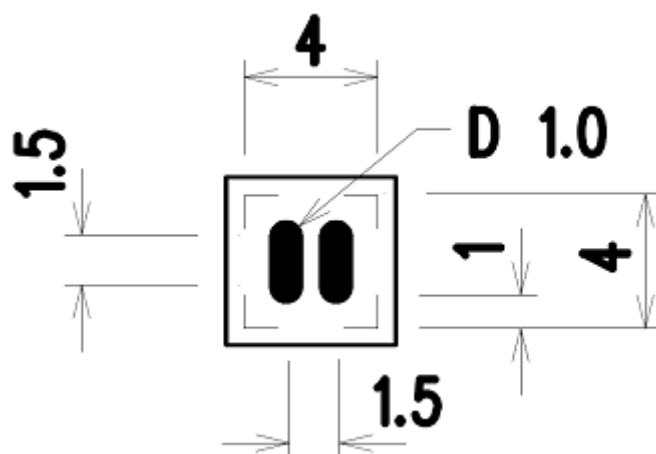
Na této DPS je dvanáct polí pájecích plošek 2x2. Jednotlivé propoje mezi pájecími ploškami jsou vyvedeny na devíti-pinové SMD konektory od firmy JST typu BM09B-ZESS-TBT. Tyto konektory mají jednoduchý zámek proti nechtěnému rozpojení při manipulaci. Všechny pájecí plošky pro kuličky pájky mají kruhový tvar o průměru 1 mm, avšak nepájivá maska nechává odhalenou měděnou plochu pouze 0,63 mm.



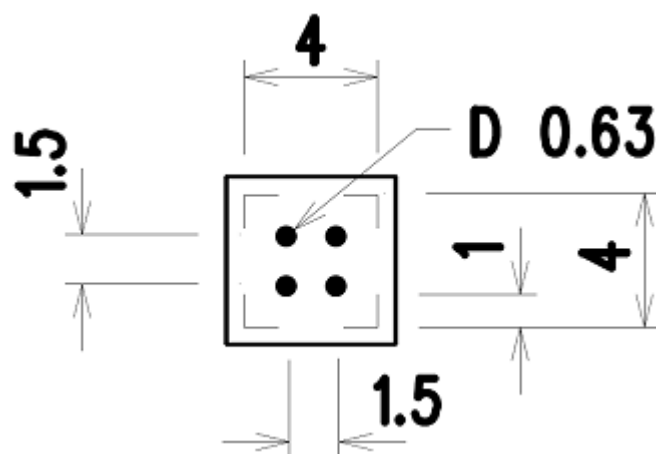
Obr. 2.3: Vodivá vrstva testovací DPS (rozměry v mm)



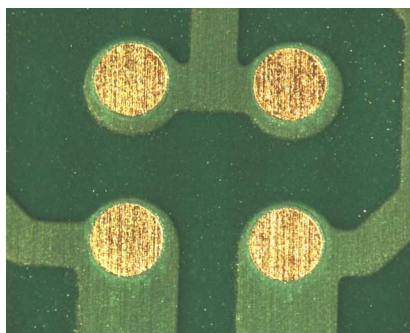
Obr. 2.4: Nepájivá maska testovací DPS (rozměry v mm)



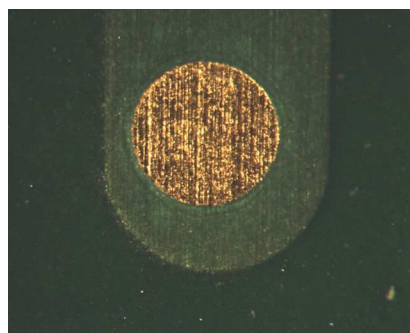
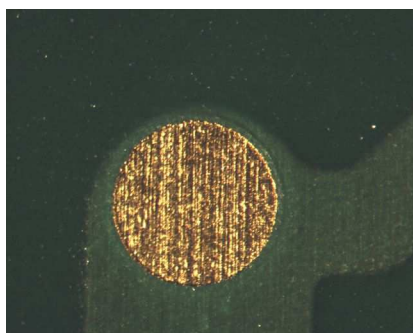
Obr. 2.5: Vodivá vrstva testovací součástky BGA4 (rozměry v mm)



Obr. 2.6: Nepájivá maska testovací součástky BGA4 (rozměry v mm)

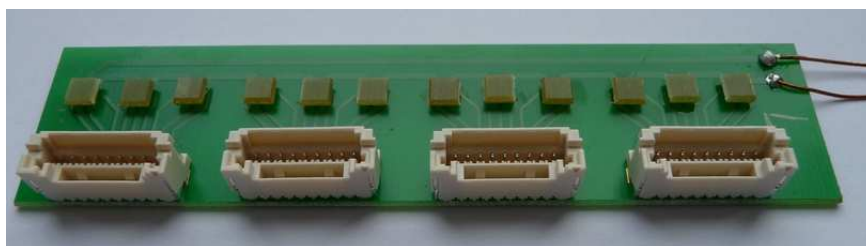


Obr. 2.7: Pájecí plošky nové testovací DPS (zvětšeno 40x)



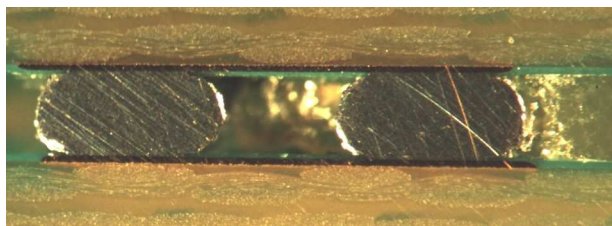
Obr. 2.8: Detaily pájecích plošek nové testovací DPS (zvětšeno 90x)

Na obr. 2.7 a 2.8 jsou v detailu pájecí plochy navržené desky. Na každé pole s 2x2 pájecími ploškami se přetavením zapájí simulovaná součástka BGA4. Vznikne tak již hotový modul pro měření (obr. 2.9). Pájecí plošky jsou vhodně propojeny, aby po zapájení mohl celou zkušební deskou protékat elektrický proud, čímž je umožněno měření pomocí čtyřbodové metody. Měří se vždy sériové zapojení dvou pájených spojů, jelikož realizace desky pro měření jednotlivých spojů by byla technicky velmi náročná. Rozměry prvků na DPS jsou naznačeny na obrázku 2.5 a 2.6. Rozteč pájecích plošek pro devíti-pinové konektory je 1,5 mm. Celkové rozměry zkušební DPS jsou 105 mm x 25 mm.

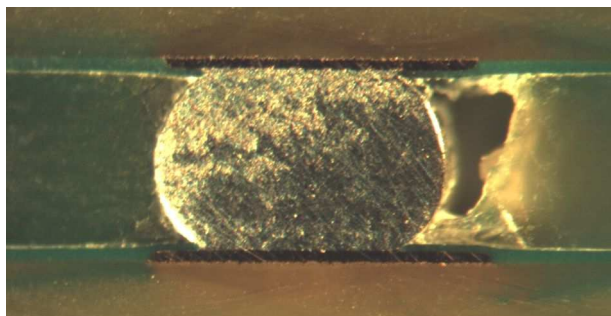


Obr. 2.9: Osazená testovací deska

Při definování pájecích ploch nepájkivou maskou je důležitou vlastností masky její adheze. Při malé adhezi pronikne pájecí slitina pod vrstvu nepájkivé masky. Změní se tak styčná plocha pájeného spoje a tím i jeho vlastnosti (jak elektrické tak i mechanické). Pro kontrolu adhezních vlastností nepájkivé masky byly vytvořeny mikrovýbrusy několika pájených spojů. Na obr. 2.10 je vidět vrstva zelené nepájkivé masky, která vymezuje styčnou plochu pájeného spoje i po přetavení.



a)



b)

Obr. 2.10: Mikrovýbrus pájeného spoje – a) zvětšeno 50x, b) zvětšeno 90x

2.2 Použité materiály

Pro testovací DPS i součástky BGA4 byl použit jednostranně plátovaný základní materiál FR4, který se v průmyslu používá velmi často. Nepájivá maska zelené barvy pod označením XV501T-4 je dvousložková. Tato maska se nanáší sítotiskem a vytvrzuje teplem. Pro ochranu pájecích ploch byly zvoleny dvě povrchové úpravy OSP a Ni/Au. Pro experimentování byly zvoleny tři průměry kulových vývodů 0,4 mm, 0,5 mm a 0,76 mm. Kulové vývody od firmy SMIC (SENJU Metal Industry Co., Ltd [21]) jsou vyrobeny z pájecí slitiny SAC405 (95,5 % Sn, 4 % Ag, 0,5 % Cu) – označení #7097. Bylo vybráno tavidlo pro bezolovnaté pájení TSF 6592 od firmy Litton Kester. DPS budou při experimentech namáhány teplotou 150 °C. Tuto teplotu by vodiče s PVC izolací nevydržely, a proto byly zvoleny měděné vodiče izolované lakem (LCTA).

2.3 Realizace povrchové úpravy OSP

Jak již bylo uvedeno v kapitole 1.3.1 nevýhodou povrchové úpravy OSP je krátká skladovatelnost. Testovací DPS i součástky BGA4 byly vyrobeny dříve pro potřeby semestrálního projektu. Od doby výroby byly uskladněny přibližně 11 měsíců. Pro relevantní výsledky bylo nutné nanést povrchovou úpravu OSP znovu (konkrétně OSP Gliccoat F2).

2.3.1 Postup pro odstranění staré povrchové úpravy OSP

Pro nanesení nové povrchové úpravy OSP je nejprve nutné odstranit původní starou povrchovou úpravu. K tomuto účelu je třeba připravit stripovací roztok.

Složení stripovacího roztoku:

- Metanol 10 hm %
- Kyselina chlorovodíková HCl (35 %) 3 hm %
- Deionizovaná voda H₂O 87 hm %

Poznámka

Hmotnostní procento [22] hm % udává množství látky v gramech obsažených ve 100 gramech roztoku. Je určené podílem hmotnosti složky B $m(B)$ a hmotnosti roztoku $m(R)$ násobeným stem (2.1):

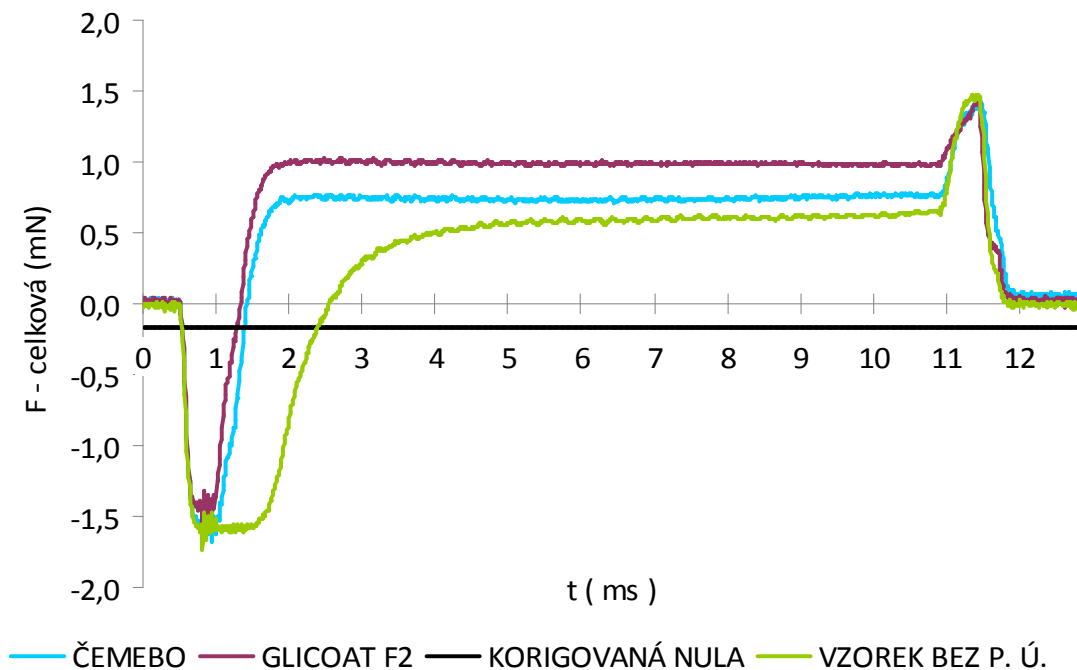
$$hm \% = \frac{m(B)}{m(R)} \cdot 100 \quad (2.1)$$

2.3.2 Postup aplikace OSP Gliccoat F2

Povrchová úprava byla na testovací DPS aplikována podle následujícího postupu:

- 1) Očištění povrchu kyselinou (ACID CLEAN) – LC 16
Odstranění nečistot mastnoty a oxidů (60 – 120 s).
- 2) Oplach vodou
Dvojetapová kaskáda (nejdříve vodou a poté deionizovanou vodou)
- 3) Mikroleptání (MICROETCH)
Odleptání 1,5 – 2,5 μm Cu (60 s)
- 4) Oplach vodou
Dvojetapová kaskáda (nejdříve vodou a poté deionizovanou vodou)
- 5) Sušení studeným vzduchem
Odstranění zbytku vody.
- 6) Aplikace Gliccoat F2 (OSP)
Teplota roztoku 40 °C, DPS ponořit na 60 – 90 sekund
- 7) Sušení studeným vzduchem
Odstranění přebytku Gliccoat F2.
- 8) Oplach deionizovanou vodou
Zabránění vodních skvrn.
- 9) Sušení (horký vzduch)
Teplota 90 °C, 20 – 60 sekund

Do nádrže s roztokem OSP (Gliccoat F2) se nesmí dostat voda nebo kyselina, proto je třeba DPS velmi dobře vysušit. Přimíchání vody do OSP se sníží jeho koncentrace a následně tloušťka filmu OSP. Přimíchání kyseliny do OSP se sníží pH a to rovněž způsobí zeslabení vrstvy OSP.



Obr. 2.11: Porovnání povrchové úpravy OSP vyrobené ve firmě ČEMEBO s povrchovou úpravou vyrobenou v laboratoři VUT

Pro ověření vlastností povrchové úpravy OSP vyrobené v laboratoři byl proveden test smáčivosti pomocí metody smáčecích vah. Tato metoda je popsána v kapitole 1.1.3. Pro porovnání byl proměřen také vzorek s povrchovou úpravou vyrobenou ve firmě ČEMEBO. Na obr. 2.11 jsou naměřené křivky. Je vidět, že úprava vyrobená v laboratoři se vyrovná úpravě průmyslově vyráběné. Maximální smáčecí síla je dokonce i vyšší než u průmyslového OSP.

2.4 Pájení v přetavovací peci

Pro zapájení testovací desky byla použita průběžná přetavovací pec DIMA SMRO 0180. Pec obsahuje dvě tepelné zóny. První zóna je určena pro předehřev a je vybavena infračerveným ohřevem. Druhá zóna je určena pro přetavení. V této zóně jsou dva tepelné elementy. Na spodní straně pece je odporový nepřímý ohřev, horní strana této zóny je osazena infračerveným zářičem. Pohyb desek z levé strany pece přes zónu předehřevu do zóny přetavení a dále do chladicí zóny na pravé straně je umožněn pomocí pásového dopravníku s regulovatelnou rychlostí posuvu.

Bylo zjištěno, že přetavovací pec DIMA SMRO 0180 nedosáhne požadované maximální teploty, kterou doporučuje výrobce bezolovnaté pájecí slitiny SAC 405 (podobné parametry pro SAC 305) firma Litton Kester ve specifikaci pro jednovrstvé DPS. Přetavovací pec musela být umístěna do prosklené pracovní komory. Pracoviště pro proces pájení je na obr. 2.12. Nastavení teplot jednotlivých zón a rychlost dopravníku bylo provedeno experimentálně. Pro dosažení pracovních teplot bylo nutné počkat asi 80 minut než se skleněné stěny prohřejí. Poté již byla teplota uvnitř stabilní a podmínka maximální teploty teplotního profilu splněna. Teplotní profil zobrazený na obrázku 2.13 byl proměřen pomocí zařízení SLIM KIC 2000 [23] v režimu teplota/čas. Pro měření byly použity dva termočlánky typu K. První byl připevněn na povrch

zkušební desky a měřil teplotu vzduchu (černá křivka - Air). Druhý byl umístěn mezi povrch zkušební desky a součástkou BGA4 (červená křivka - Pod BGA4)



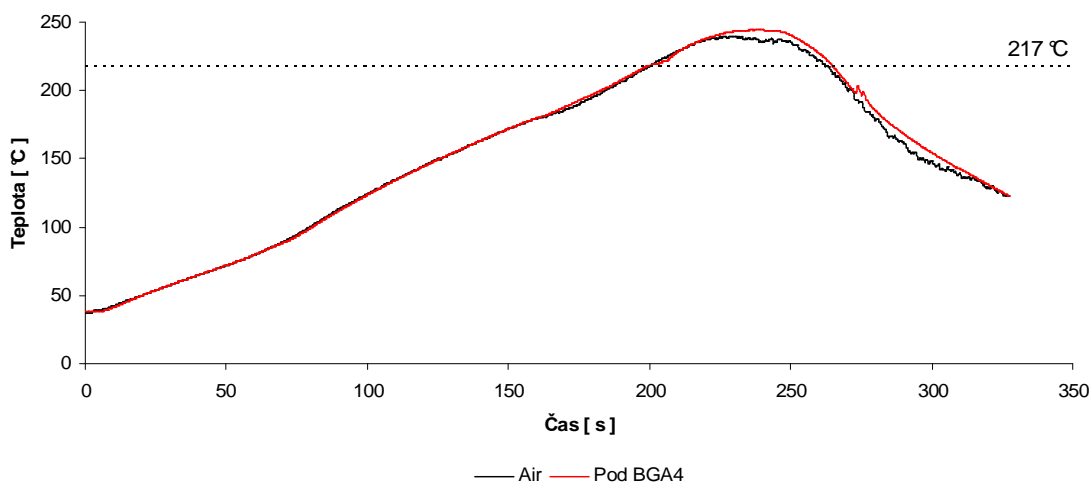
Obr. 2.12: Pracoviště procesu pájení

Nastavení pece DIMA SMRO 0180:

- Nastavení teplotních elementů – Předehřev: 280 °C
 - Dolní ohřev: 280 °C
 - Horní ohřev: 400 °C
- Nastavení rychlosti dopravníku (stav počítadla): 13, tj. 1,9 mm s⁻¹

Po finálním nastavení přetavovací pece byly proměřeny parametry teplotního profilu. Pro ověření naměřených hodnot bylo měření třikrát zopakováno. Dosažené hodnoty teplotního profilu:

- Maximální teplota: 244,5 °C
- Doba nad liquidem: 65 sekund
- Doba předehřevu (150 °C – 215 °C): 92 sekund



Obr. 2.13: Podélný teplotní profil v průběžné přetavovací peci DIMA SMRO 0180 pro osazenou testovací DPS (viz. obr. 2.9)

2.4.1 Výpočet integrálu energie dodané pájenému spoji [12]

V odborné literatuře [24] je integrál energie dodaný pájenému spoji v procesu pájení nazýván „Heating Factor“ s označením Q_h . Rozměrem této veličiny je Kelvin x Sekunda.

Pro určení integrálu energie byla z tabulkového procesoru MS Excel získána pomocí spojnice trendu rovnice regrese popisující křivku nad čarou likvidu (217 °C) pro nastavený přetavovací teplotní profil (s přesností 99,4 %). V rovnici 2.2 popisuje polynom čtvrtého stupně křivku naměřeného teplotního profilu pro jednovrstvou DPS.

$$y = \frac{1}{2000000}x^4 - 0,0003x^3 + 0,003x^2 + 1,0905x - 1,7792, \quad (2.2)$$

kde y označuje proměnnou teploty a x označuje proměnnou času. Výpočtem určitého integrálu této rovnice podle času nad čarou likvidu byla stanovena číselná hodnota odpovídající energii dodané pájenému spoji během procesu pájení. Určitý integrál dodané energie pro teplotní profil jednovrstvé DPS je uveden v rovnici 2.3.

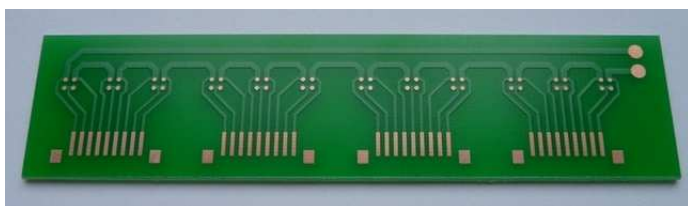
$$Q_h = \int_0^{65} \left[\frac{1}{2000000}x^4 - 0,0003x^3 + 0,003x^2 + 1,0905x - 1,7792 \right] \quad (2.3)$$

$$Q_h = 1239,89 \text{ K s} \quad (2.4)$$

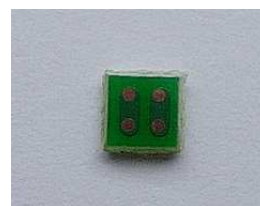
Číselná hodnota určitého integrálu byla vypočtena programem Maple 12.

2.4.2 Postup při pájení

1. Příprava desek k zapájení (obr. 2.14). Desky jsou z výroby v přířezu. I když jsou připraveny k rozlámání pomocí drážkování, je vhodné použít ostrý nůž (potřebná síla k rozlámání je stále velká).



a)



b)

Obr. 2.14: Připravená a) testovací DPS a b) BGA4

2. Nanesení tenké vrstvy tavidla TSF 6592 na pájecí plošky simulovaných součástek BGA4.
3. Osazení kuliček pájky SAC 405 (obr. 2.15) na pájecí plošky simulovaných součástek BGA4 (osvědčilo se nanášení pomocí hrotu špendlíku).



Obr. 2.15: Součástka BGA4 s naneseným tavidlem a osazená kuličkami pájky

4. Zapájení přetavením v peci DIMA SMRO 0180 s definovaným podélným teplotním profilem.
5. Nanesení tavidla TSF 6592 na pájecí plošky testovacích DPS.
6. Osazení připravených zapájených součástek BGA4 na testovací DPS.
7. Nanesení pájecí pasty disperzerem na pájecí plošky pro měřicí konektory.
8. Osazení měřicích SMD konektorů.
9. Zapájení přetavením v peci DIMA s předem definovaným podélným teplotním profilem (stejný teplotní profil jako v bodě 3).
10. Ruční připájení vodičů k proudovým měřicím svorkám testovací desky.

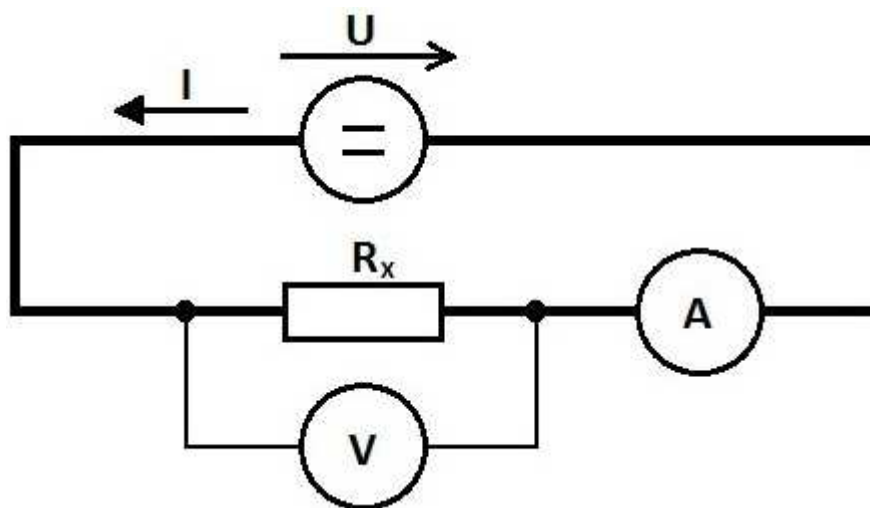
2.5 Metodika sledování elektrické vodivosti pájeného spoje

Pro měření vodivosti jednotlivých pájených spojů byla zvolena stejnosměrná čtyřbodová metoda měření elektrického odporu [25]. Tato metoda měření eliminuje vliv elektrického odporu přívodních měřicích vodičů, a proto je vhodná pro měření velmi malých hodnot odporu, respektive vodivostí. Schématické zapojení čtyřbodové metody měření odporu je na obr. 2.16. Všemi spoji na testované desce se nechá protékat definovaný proud a měří se úbytky napětí vznikající na jednotlivých pájených spojích. Následně se z naměřených hodnot proudů a úbytků napětí vypočítá elektrická vodivost jednotlivých pájených spojů podle vzorce (2.5)

$$G = \frac{I}{U}, \quad (2.5)$$

kde G je elektrická vodivost, I protékající proud a U je úbytek napětí. Při měření je zvolen měřicí proud 0,6 A z toho důvodu, aby přesnost odečtu hodnot na voltmetru a ampérmetru byla co možná nejvyšší, ale zároveň aby se nezvyšovala teplota měřeného pájeného spoje.

Jelikož je pájený spoj sloučeninou několika kovů s rozdílnou elektrickou vodivostí, projeví se v něm také termoelektrické napětí, které se přičítalo nebo odečítalo k úbytku napětí na spoji při měření v závislosti na směru měřicího proudu. Před vlastním měřením elektrické vodivosti bylo toto napětí experimentálně změřeno a jeho hodnota činila 1,8 μ V při teplotě pájeného spoje 40 °C. Při zachování polarity měřicího proudu a konstantní teplotě vzorků při měření však toto napětí nemělo vliv na sledování změn elektrické vodivosti, protože je jeho hodnota přibližně konstantní. Nepatrně ovlivnilo pouze absolutní hodnoty vodivostí pájených spojů přibližně o 0,2 %, což je v dalším vyhodnocení zanedbáno.

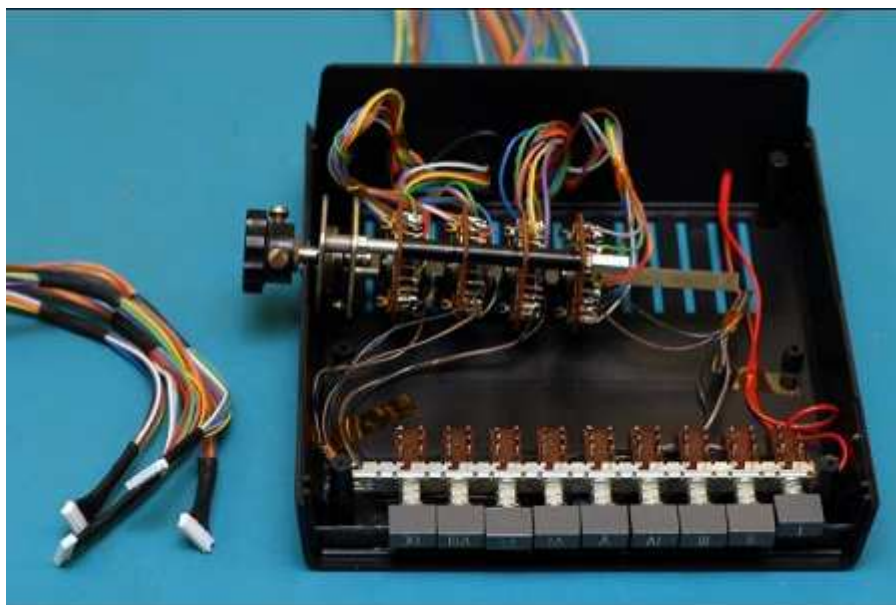


Obr. 2.16: Čtyřbodová metoda pro měření velmi malých odporů

2.5.1 Použité přístroje

Všechny přístroje a zařízení použité pro experimenty jsou uvedeny v tab. 2.1.

Pro měření byl jako proudový zdroj použit regulovatelný symetrický zdroj Diametral. Jako voltmetr byl zapojen multimetr MIT 291 výrobce Metra Blansko. Kontrola nastaveného proudu byla prováděna multimetrem Agilent 34410A. Elektrickou vodivost silně ovlivňuje teplota měřeného spoje, proto byly testovací DPS během měření uloženy v přesném teplotním stabilizátoru Friocell s přesností nastavení teploty $0,1\text{ }^{\circ}\text{C}$ v rozsahu $0 - 100\text{ }^{\circ}\text{C}$.



Obr. 2.17: Přípravek pro přepínání jednotlivých měřených pájených spojů

Pro přepínání jednotlivých pájených spojů při měření bylo použito již sestrojené přepínací ústrojí zobrazené na obrázku 2.17. Jedná se o kombinaci 6-ti polohového otočného přepínače s čtyřpolohovým sériovým přepínačem, což odpovídá počtu měřených spojů. Délka měřících vodičů je $1,5\text{ m}$, aby měřené DPS mohly být během měření umístěny v teplotním stabilizátoru.

Na vstup přepínače jsou přivedeny vodiče připojené přes SMD konektory z testovaných DPS (barevné ploché kabely). Výstupem přepínače je červená dvojlinka připojená při měření na milivoltmetr měřící úbytek napětí na jednotlivých pájených spojích.

Tab. 2.1: Seznam použitých měřicích přístrojů a zařízení

Zařízení	Výrobce	Typové označení	Výrobní číslo
Teplotní skříň	BMT	Friocell 55	992526
Stabilizovaný zdroj	Manson	EP-613	320571114
Stabilizovaný zdroj	Tesla	BK 127	516330
Multimetr	Metra Blansko	M1T 291	3 914844
Multimetr	Agilent	34410A	MY47012821
Přetavovací pec	SMT Systems	DIMA SMRO-0180	901139
Horkovzdušný sterilizátor	Chirana	HS 61A	792304
Profiloměr	KIC	SlimKIC	-
Bruska	METASINEX	-	-
Optický mikroskop	Olympus	SZ61, 90x	5H03985
Kamera	Olympus	UI-1440-C	4002612050
Optický mikroskop	Nikon	Elipse, 1000x	-

2.5.2 Postup měření elektrické vodivosti

Pro měření elektrické vodivosti bylo vytvořeno měřicí pracoviště viz. obr. 2.18. Před vlastním měřením vodivosti byly jednotlivé vzorky vloženy do stabilizační komory a po dobu 30 minut byly temperovány na teplotu 40 °C. Tato teplota byla pro měření zvolena tak, aby měřené DPS nebyly ovlivněny okolní teplotou, ale na druhou stranu nebyly zbytečně teplotně zatěžovány. Po nezbytné době temperování byly změřeny vodivosti jednotlivých pájených spojů na zkušební desce. Následovalo připojení další desky na měřicí zařízení. Teplotní stabilizace každé následující desky trvala 5 - 10 minut, jelikož desky již byly půl hodiny temperovány.

Aby byly měřicí podmínky pro všechna měření stejné, byly označeny proudové svorky na měřených DPS. Tím se spolehlivě zajistilo dodržení stejné polarity stejnosměrného proudu pro všechny DPS.



Obr. 2.18: Pracoviště pro měření elektrické vodivosti

2.6 Vyhodnocení naměřených výsledků a jejich diskuze

2.6.1 Porovnání povrchové úpravy OSP uskladněných DPS

Nevýhodou povrchové úpravy OSP, jak již bylo popsáno v kapitole 1.3.1, je krátká doba skladovatelnosti. Testovací DPS byly uskladněny 11 měsíců.

Z naměřených výsledků viz. tab. 2.2 vyplývá pokles elektrické vodivosti pájeného spoje téměř o 4 % způsobené pouze uskladněním DPS. To je pro experimenty nevyhovující, a proto byla povrchová úprava OSP odstraněna a nanášena nová „čerstvá“ úprava OSP podle pracovního postupu popsaného v kapitole 2.3.2.

Tab. 2.2: Porovnání hodnot vodivosti povrchové úpravy OSP

	G	Změna G
	(S)	(%)
Nové OSP	564,4	-
Staré OSP	542,9	- 3,95

2.6.2 Vyhodnocení plocha spoje/objem pájky

Pro porovnávání bylo nutné zajistit stejné parametry všech DPS. Jedná se především o rozměry DPS. Proto byly navržené DPS zadány do profesionální výroby. Vyrobeny byly firmou ČeMeBo s.r.o. v kooperaci s firmou Gatema s.r.o.

Po obdržení vyrobených DPS byl proměřen nejdůležitější rozměr – průměr pájecích plošek pro kulové vývody (tab. 2.3).

Tab. 2.3: Naměřené hodnoty pájecích plošek testovací DPS a BGA4

Měření	d (DPS)	d (BGA4)
(-)	(mm)	(mm)
1	0,68	0,59
2	0,68	0,60
3	0,67	0,59
4	0,67	0,59
5	0,67	0,60
6	0,67	0,59
7	0,67	0,59
8	0,68	0,60
9	0,68	0,60
10	0,68	0,59
11	0,68	0,60
12	0,67	0,60
13	0,68	0,60
14	0,67	0,59
15	0,68	0,60

Z naměřených hodnot průměrů pájecích plošek byly vypočítány průměrné hodnoty průměrů podle vztahu (2.6)

$$\bar{d} = \frac{\sum_{i=1}^N d_i}{N}, \quad (2.6)$$

kde d je naměřená hodnota průměru pájecí plošky a N je celkový počet měření. Byl proveden i výpočet směrodatné odchylky podle vztahu (2.7). Vypočítané hodnoty průměrů a směrodatných odchylek jsou v tab. 2.4

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (x_i - \bar{x})^2} \quad (2.7)$$

Tab. 2.4: Vypočítané hodnoty pro pájecí plošky

	\bar{d}	σ
	(mm)	(mm)
DPS	0,675	$4,989 \cdot 10^{-3}$
BGA4	0,595	$4,989 \cdot 10^{-3}$

Směrodatné odchylky obou změřených souborů hodnot jsou velmi malé, nejedná se tedy o náhodné odchylky od požadovaného rozměru – průměr pájecích plošek 0,63 mm. Pro přesnější hodnotu by bylo nutné ve firmě vyrobit zkušební vzorky, proměřit je a dostavit potřebné parametry. To by rovněž znamenalo vyšší výrobní náklady.

Pro vyhodnocení poměru plocha spoje/objem pájky (S/V) bude použit průměr mezi vypočítanými hodnotami pro DPS a BGA4 z tab. 2.4. Tato hodnota činí $d = 0,635$ mm. Plochu pájecí plošky lze tedy vypočítat podle

$$S = \frac{\pi \cdot d}{4} \quad (2.8)$$

$$S = \frac{\pi \cdot 0,635}{4} = 0,317 \text{ mm}^2 \quad (2.9)$$

Objem pájky V je možné vypočítat ze vztahu pro výpočet objemu koule (2.10), kde d je průměr koule a konkrétně v tomto případě představuje průměr kuličky pájky.

$$V = \frac{1}{6} \pi \cdot d^3 \quad (2.10)$$

Tab. 2.5: Vypočítané hodnoty poměru plocha spoje/objem pájky (S/V)

d	V	Poměr S/V
(mm)	(mm ³)	(mm ⁻¹)
0,40	0,0335	9,46
0,50	0,0655	4,84
0,76	0,2298	1,38

Z tab. 2.5 je zřejmé, že se zvyšujícím se průměrem použité kuličky pájky klesá poměr plocha spoje/objem pájky. Čím větší je tento poměr, tím rychleji dojde k saturaci mědi ve spoji a začíná růst intermetalické vrstvy.

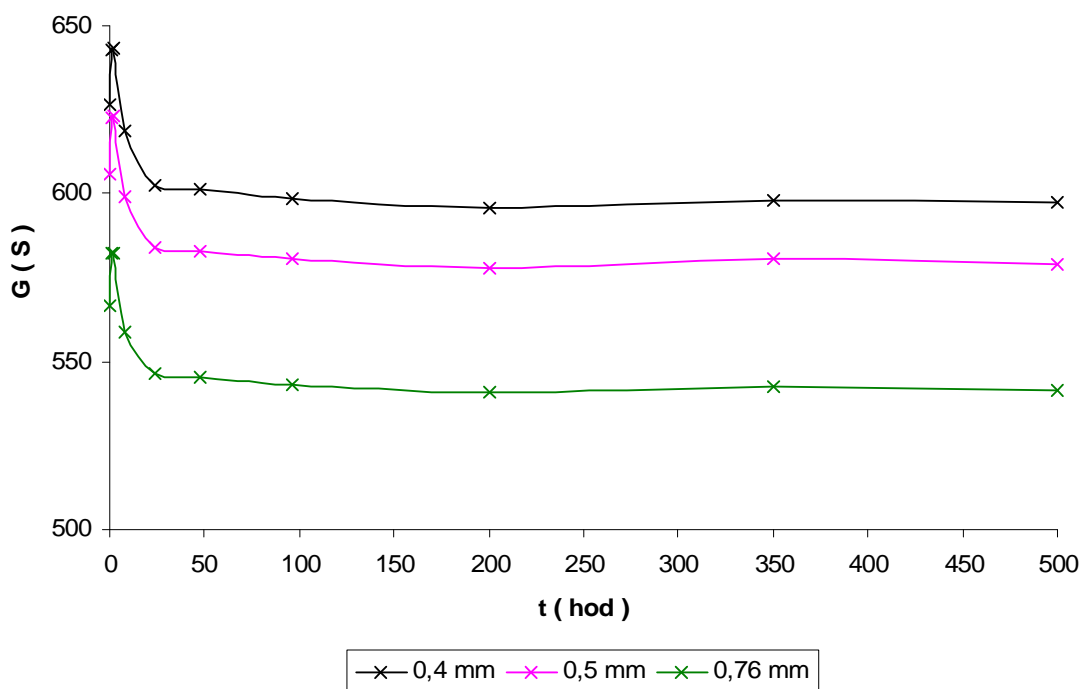
2.6.3 Vyhodnocení izotermálního stárnutí

Zrychlené zkoušky [29] jsou zkoušky, při kterých se zrychluje mechanismus poruch např. zvětšením zátěže nebo zrychlením časového průběhu oproti normálnímu provozu. Izotermální stárnutí je typem zrychlené zkoušky s konstantním zatížením. V tomto případě s konstantní teplotou 150 °C. V literatuře [30], [31], [32] je uveden vztah počtu hodin izotermálního stárnutí a počtu hodin odpovídající provozu zařízení při provozních podmínkách. Konkrétně izotermální stárnutí při 125 °C po dobu 720 hodin odpovídá době 7,8 let provozu zařízení při provozní teplotě 60 °C.

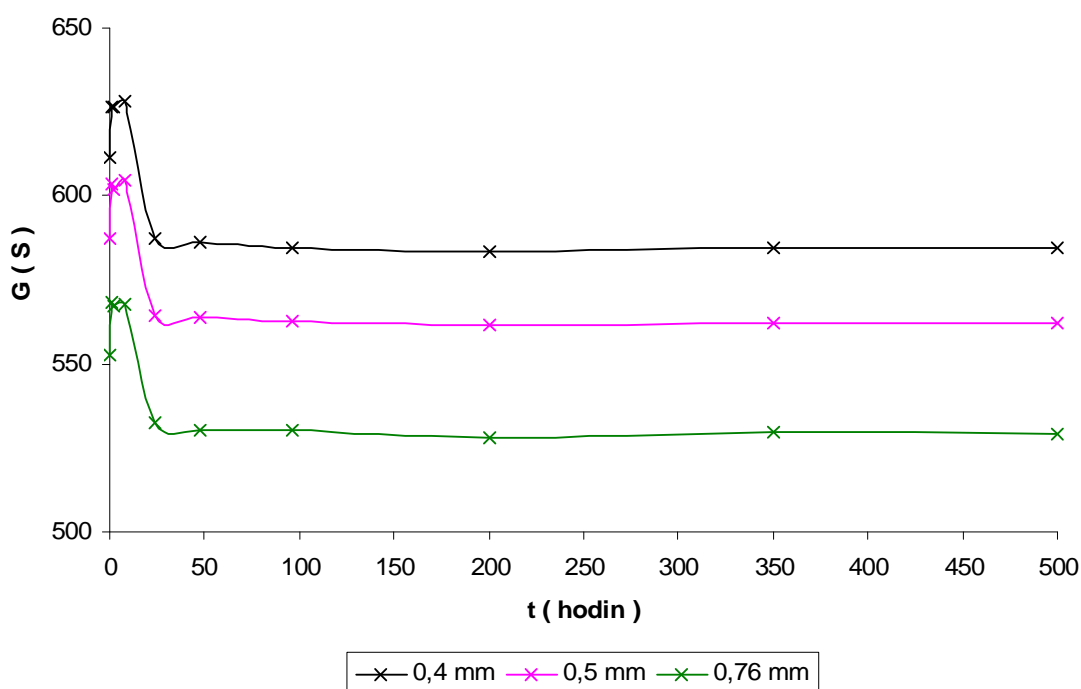
Pro experiment byly zvoleny dvě povrchové úpravy OSP a Ni/Au. Byly zapájeny tři sady testovacích DPS. V první sadě bylo použito povrchové úpravy OSP jak na testovací DPS tak i na součástkách BGA4 (dále používáno OSP – OSP). Ve druhé sadě bylo použito úpravy Ni/Au rovněž pro DPS i součástky BGA4 (dále používáno Ni/Au – Ni/Au). Pro třetí sadu byla zvolena kombinace povrchových úprav. Pro DPS byla

použita úprava OSP a pro součástky BGA4 Ni/Au (dále používáno OSP – Ni/Au).

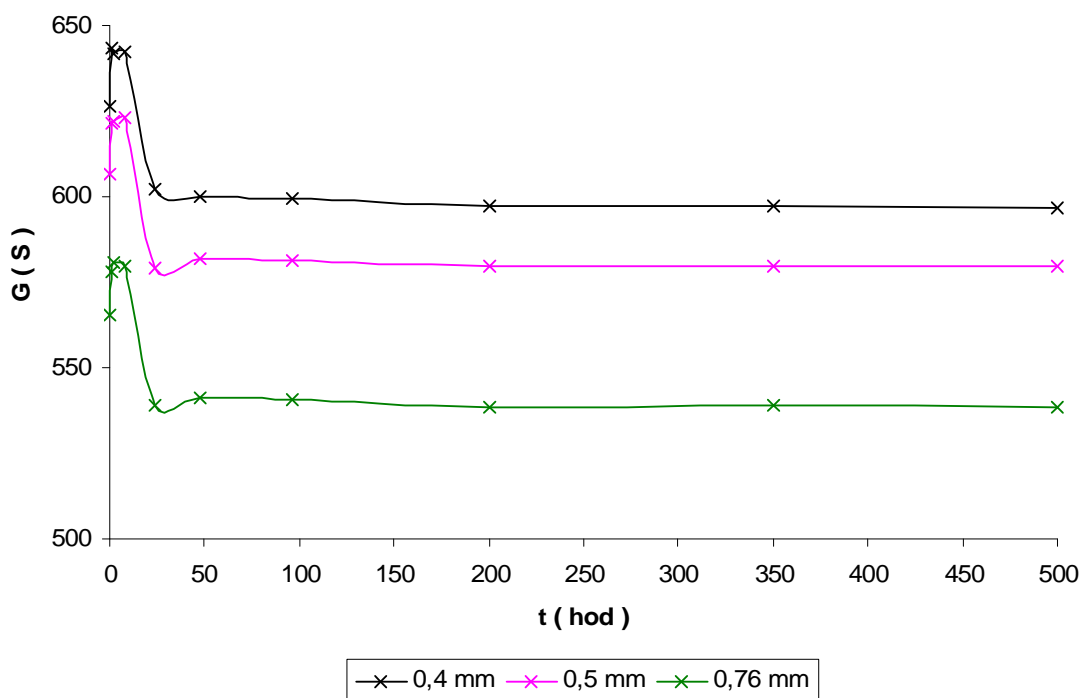
Experiment byl rozšířen použitím tří typů pájecích kuliček, resp. tří různých průměrů - 0,4 mm, 0,5 mm a 0,76 mm. Tím se zvýší počet sledovaných testovacích desek ze tří na devět. Měření elektrické vodivosti proběhlo před izotermálním stárnutím a poté v časech 1, 2, 8, 24, 48, 96, 200, 350 a 500 hodin izotermálního stárnutí při teplotě 150 °C.



Obr. 2.19: Časová závislost vodivosti pro povrchovou úpravu OSP – OSP



Obr. 2.20: Časová závislost vodivosti pro povrchovou úpravu Ni/Au - Ni/Au



Obr. 2.21: Časová závislost vodivosti pro povrchovou úpravu OSP – Ni/Au

Na obr. 2.19 – 2.21 jsou časové závislosti elektrické vodivosti za působení izotermálního stárnutí při teplotě 150 °C. Je vidět, že všechny zásadní změny se odehrály v časovém intervalu 0 – 48 hodin. V prvních hodinách stárnutí došlo k nárůstu elektrické vodivosti. Tento nárůst byl způsoben rekrytalizací zapájeného spoje. Poté již elektrická vodivost klesala až do času asi 48 hodin. Od této doby elektrická vodivost klesala jen mírně.

Při porovnání jednotlivých povrchových úprav, jsou úrovně naměřených hodnot přibližně stejné pro OSP – OSP a OSP – Ni/Au. Hodnoty Ni/Au – Ni/Au jsou oproti ostatním nižší.

Nejvyšší hodnoty elektrické vodivosti jsou pro kulový vývod o průměru 0,4 mm a naopak nejnižší jsou pro vývod o průměru 0,76 mm. Tato závislost souvisí s výškou zapájeného spoje, resp. délkou cesty elektrického proudu pájecí slitinou a IMC vrstvami.

2.6.4 Vyhodnocení kombinované zkoušky

Pro tento test byla vybrána kombinace povrchových úprav – testovací DPS s úpravou OSP a součástky BGA4 s úpravou Ni/Au. Byly použity tři průměry kuliček pájky 0,4 mm, 0,5 mm a 0,76 mm. Do testu tedy vstupovaly tři zapájené testovací DPS.

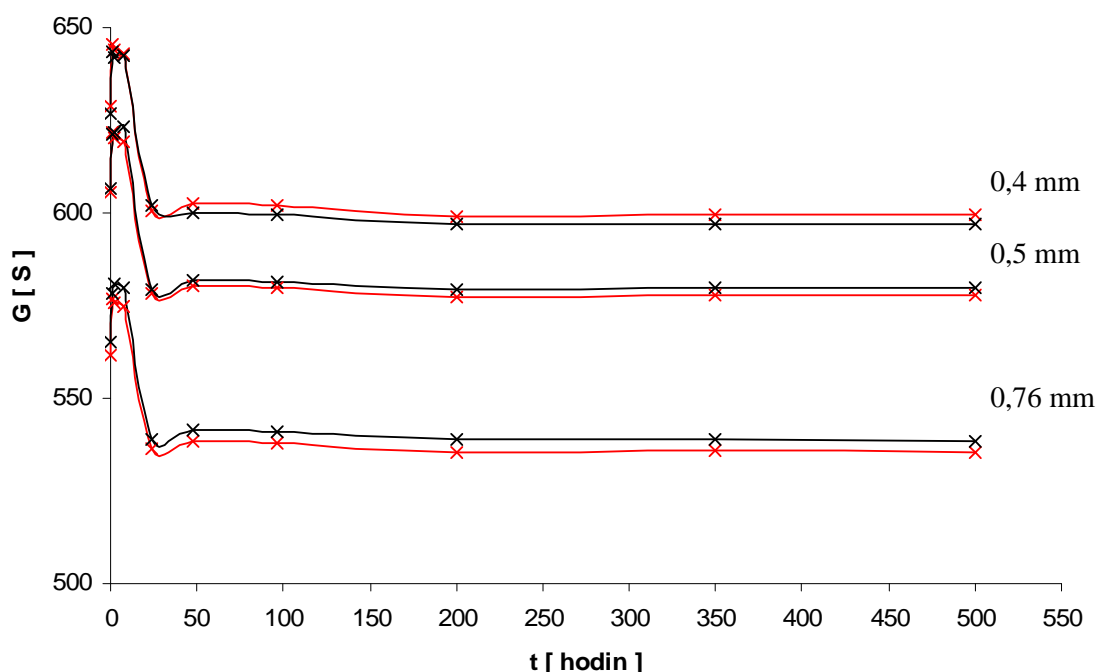
Podle názvu kapitoly jde o kombinaci dvou typů namáhání - stárnutí. Konkrétně o izotermální stárnutí a proudové zatížení. Test probíhal paralelně s testem popsáním v kapitole 2.6.3 při stejné teplotě. Měření vodivosti pájeného spoje byla prováděna ve stejných časech. Testovací DPS byly sériově propojeny a připojeny na proudový zdroj. Hodnota procházejícího proudu byla zvolena 1 A. Proudová hustota se vypočítá podle vztahu (2.11), kde I je zvolený procházející proud a S je plocha pájecí plošky. Plocha plošky byla určena vztahem (2.8) $S = 0,317 \text{ mm}^2$.

$$J = \frac{I}{S} \quad (2.11)$$

$$J = \frac{1}{0,317} = 3,155 \text{ A mm}^2 = 315,5 \text{ A cm}^2 \quad (2.12)$$

V grafu viz. obr. 2.22 jsou porovnány naměřené změny vodivosti kombinované zkoušky s naměřenými výsledky pouze izotermálního stárnutí. Červené křivky značí naměřené hodnoty s použitým proudovým namáháním a černé křivky bez proudového namáhání.

Při použití proudového namáhání o hodnotě proudu 1 A se hodnoty elektrické vodivosti lišily minimálně od hodnot bez použití proudového zatížení. Tyto odchylky je možné také přisoudit chybě měřicí metody. Použitý proud by musel být vyšší, aby došlo k výraznější degradaci spoje, a tím i ke změně elektrické vodivosti.

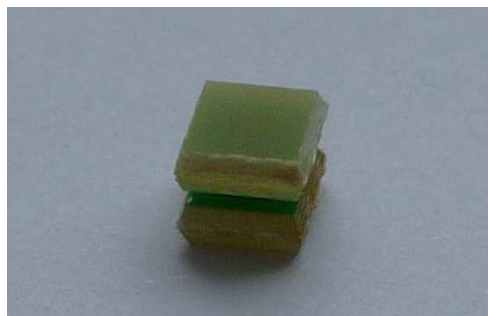


Obr. 2.22: Porovnání výsledků kombinovaného stárnutí (p. ú. OSP – Ni/Au)

2.6.5 Vyhodnocení růstu intermetalické vrstvy (IMC)

Pro vyhodnocení růstu IMC vrstvy byly připraveny zvlášť vzorky od všech pozorovaných DPS popsaných v kapitole 2.6.3 (kombinace dvou povrchových úprav a třech průměrů kulových vývodů). Vzorky byly vytvořeny zapájením dvou součástek BGA4 „proti sobě“ (viz obr. 2.23). Vzorky byly přiloženy k testovaným DPS a v jednotlivých časech izotermálního stárnutí byly odebrány a archivovány.

Růst intermetalické vrstvy byl pozorován u vzorků, kde byla použita povrchová úprava OSP na obou součástkách BGA4. Zvoleny byly krajní případy průměrů kulových vývodů – 0,4 mm a 0,76 mm. Před samotným pozorováním pod mikroskopem byly vzorky zality do pryskyřice (Dentacryl) a vyleštěny (viz. kapitola 1.1.5).



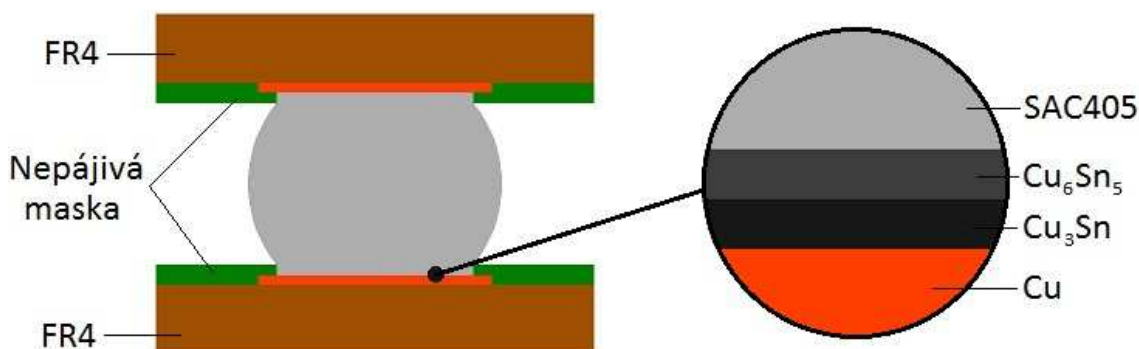
Obr. 2.23: Vzorek vyrobený pro sledování růstu IMC vrstvy

Pozorování proběhlo na optickém mikroskopu Nikon Eclipse při jeho maximálním zvětšení 1000x. Při tomto zvětšení jsou již velmi vysoké požadavky na rovinnost sledované plochy a kolmost mikrovýbrusu vůči manipulačnímu stolu mikroskopu. Proto jsou některé fotografie v některých místech nezaostřeny. Všechny fotografie jsou orientovány tak, že ve spodní části je plátovaná měděná vrstva a v horní části fotografie je pájecí slitina kulového vývodu.

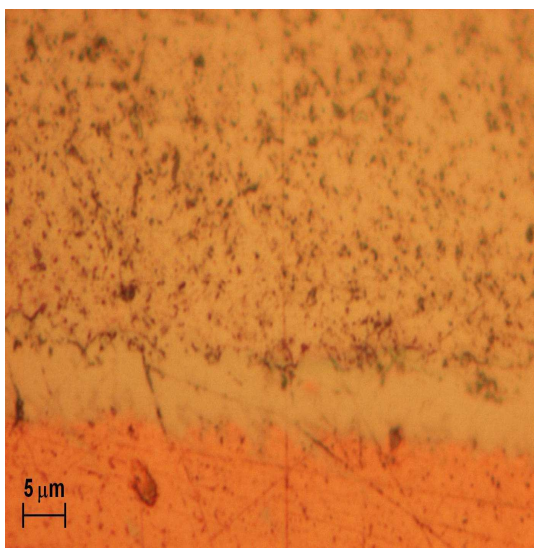
Na obr. 2.25 jsou vyfoceny vzorky s povrchovou úpravou OSP a kulovým vývodem 0,4 mm pro různé doby izotermálního stárnutí, konkrétně pro 0 hodin (nestárnutý referenční vzorek), 8 hodin, 96 hodin a 500 hodin. Tyto časy byly vybrány záměrně pro pozdější sestavení časové závislosti růstu IMC vrstvy. Na obr. 2.26 jsou fotografie vzorků pro stejnou povrchovou úpravu a pro stejné časy, ale s kulovým vývodem o průměru 0,76 mm.

V obou případech jsou vidět dvě intermetalické vrstvy (obr. 2.24). První IMC vrstva je Cu_3Sn . Tato vrstva je v kontaktu přímo s vrstvou mědi a pro čas 0 hodin je velmi tenká (na fotografiích je špatně viditelná). Druhou vrstvou je sloučenina Cu_6Sn_5 , ta je naopak v přímém kontaktu s pájecí slitinou.

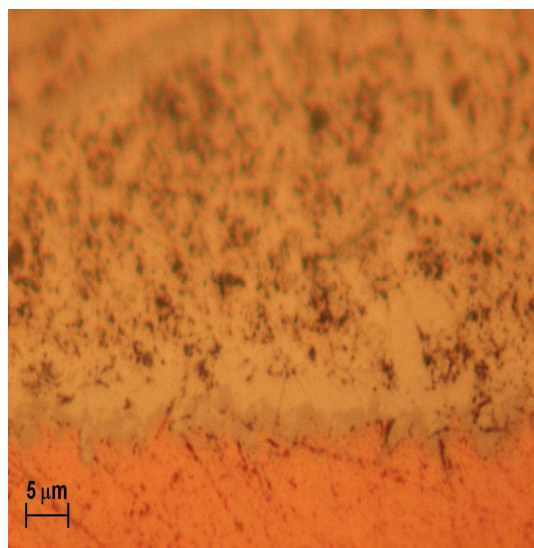
Při porovnání fotografií ve stejných časech je jasně vidět rychlejší růst IMC vrstev u vzorků s průměrem vývodu 0,4 mm. Tato rychlost úzce souvisí s množstvím pájky. Pájecí slitina se rychleji nasytí mědí, a proto rychleji roste i IMC vrstva.



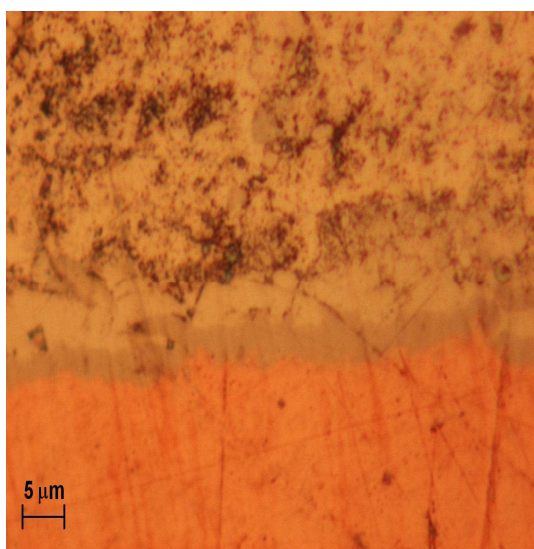
Obr. 2.24: Řez zapájeným vzorkem s povrchovou úpravou OSP



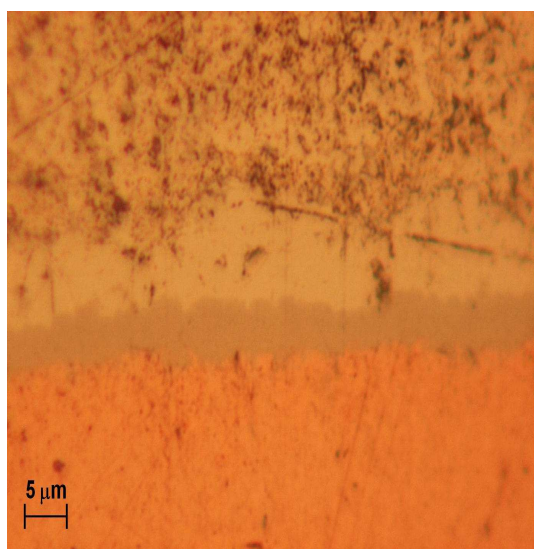
a) 0 hodin



b) 8 hodin

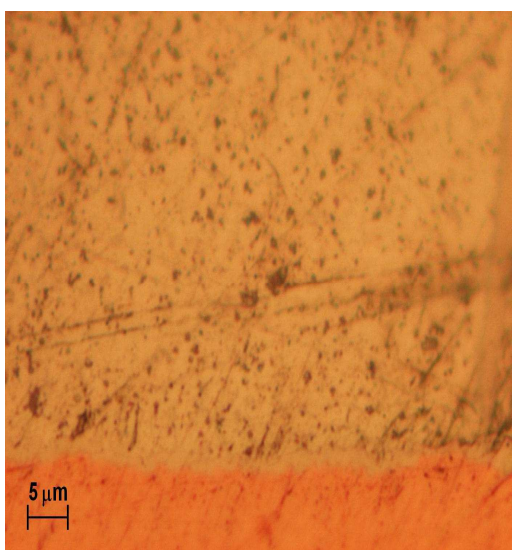


c) 96 hodin

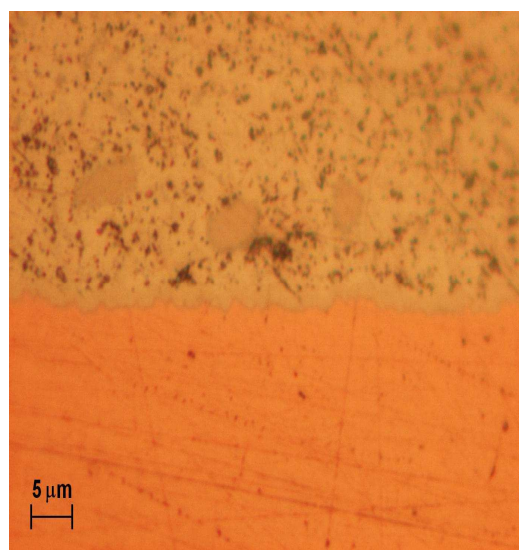


d) 500 hodin

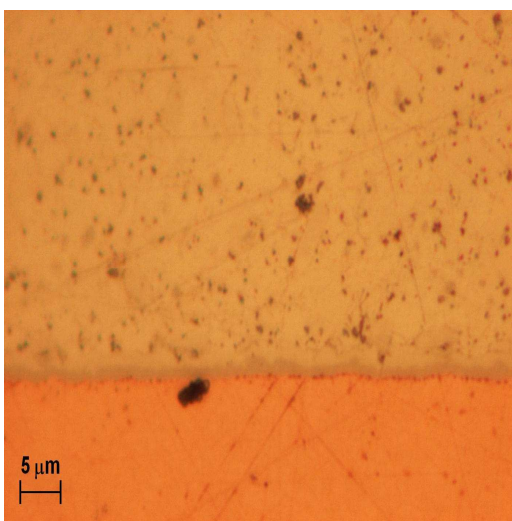
Obr. 2.25: Mikrovýbrusy pájených spojů s povrchovou úpravou OSP - OSP, kulový vývod o průměru 0,4 mm - zvětšeno 1000x



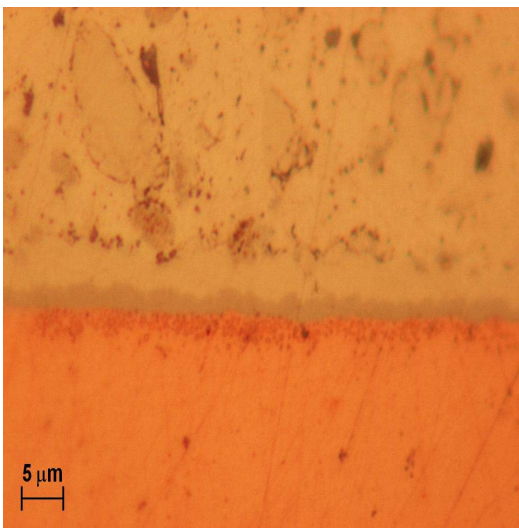
a) 0 hodin



b) 8 hodin



c) 96 hodin



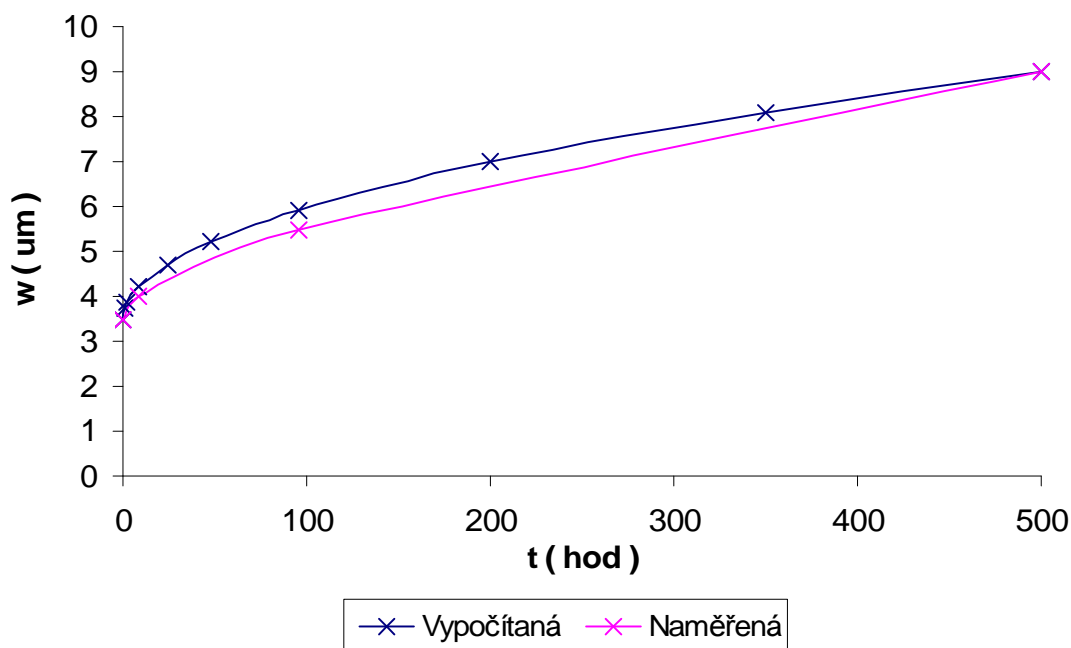
d) 500 hodin

Obr. 2.26: Mikrovýbrus pájeného spoje s povrchovou úpravou OSP - OSP, kulový vývod o průměru 0,76 mm - zvětšeno 1000x

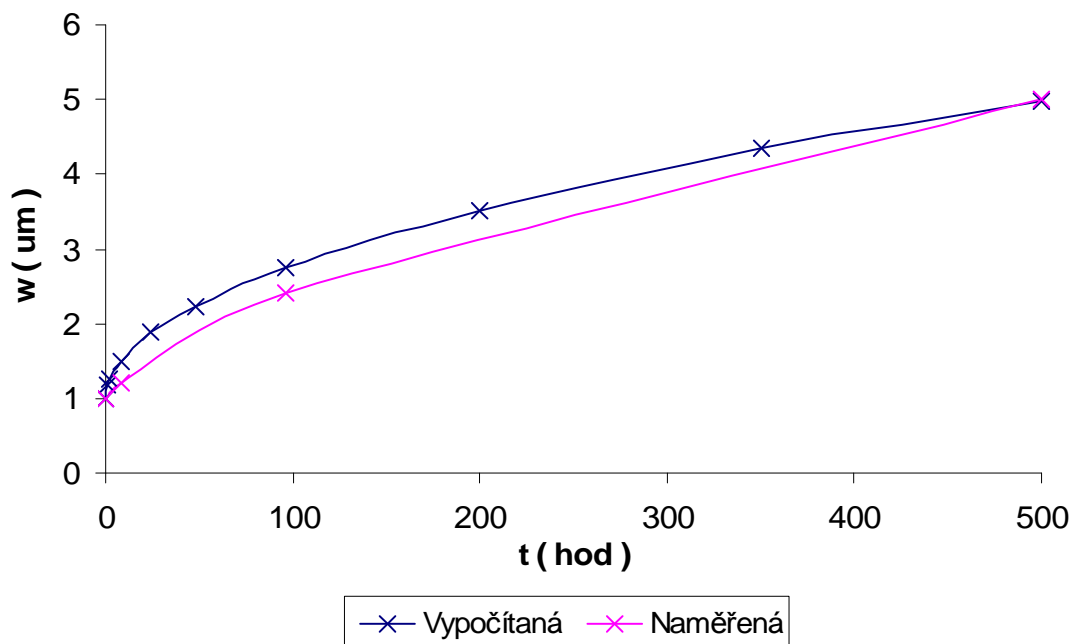
Z obr. 2.25 a obr. 2.26 byly pomocí optického mikroskopu změřeny tloušťky IMC vrstvy viz. tab. 2.6. Pomocí vzorce (1.3) je možné vypočítat tloušťku intermetalické vrstvy pro různý čas. Do vzorce byla dosazena hodnota aktivační energie $70,9 \text{ kJ mol}^{-1}$. Vypočítané hodnoty tloušťky IMC vrstvy byly vyneseny do grafu a porovnány s naměřenými hodnotami (viz. obr. 2.27 pro průměr vývodu 0,4 mm a obr. 2.28 pro průměr 0,76 mm).

Tab. 2.6: Změřené tloušťky IMC vrstev pro povrchovou úpravu OSP

t	d = 0,4 mm	d = 0,76 mm
	w	w
(hod)	(μm)	(μm)
0	3,5	1,0
8	4,0	1,2
96	5,5	2,2
500	9	5,0



Obr. 2.27: Porovnání vypočítaných a naměřených hodnot pro povrchovou úpravu OSP – OSP a kulový vývod o průměru 0,4 mm



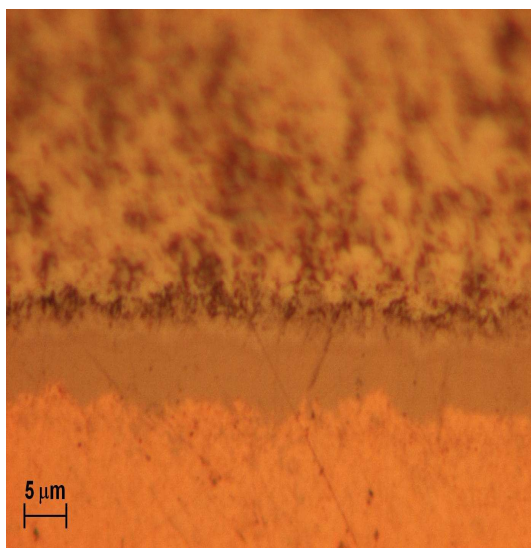
Obr. 2.28: Porovnání vypočítaných a naměřených hodnot pro povrchovou úpravu OSP – OSP a kulový vývod o průměru 0,76 mm

Pro srovnání byly vyrobeny mikrovýbrusy vzorků s povrchovou úpravou Ni/Au (pro obě BGA4) pro průměr kulového vývodu 0,4 mm a 0,76 mm. Byl zvolen počáteční čas 0 hodin a koncový čas 500 hodin.

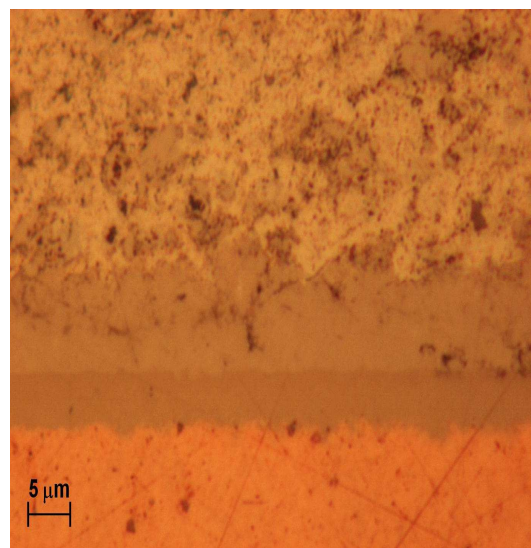
Tmavší vrstva, která je přímo na měděném povrchu je nanesený nikl (jedna část povrchové úpravy, vrstva zlata se při přetavení rozpouští do pájecí slitiny). Vrstva niklu brání difúzi mědi do pájecí slitiny. Při použití povrchové úpravy Ni/Au vznikají na rozhraní pájecí slitina – měděný povrch ternární sloučeniny. V různých odborných studiích [26], [27] lze nalézt, že tyto sloučeniny mohou být typu $(\text{Cu}_{1-x}\text{Ni}_x)_6\text{Sn}_5$ nebo $(\text{Ni}_{1-x}\text{Cu}_x)_3\text{Sn}_4$.

Při porovnání ve stejných časech je opět na první pohled vidět, že IMC vrstva je u většího kulového vývodu (obr. 2.30) několikrát menší než u menšího vývodu (obr. 2.29). Nyní je také možné porovnat rychlost růstu IMC vrstvy při povrchové úpravě OSP a Ni/Au. Vzorky s povrchovou úpravou Ni/Au vykazovaly pomalejší růst IMC vrstev, protože ve srovnání s Sn/Cu systémem má systém Sn/Ni vyšší aktivační energii Q . Proto se používá niklu jako bariérové vrstvy, aby se zabránilo rychlé spotřebě měděného substrátu.

Z důvodu časové náročnosti přípravy vzorků pro pozorování pod mikroskopem a následné pozorování, byla práce zaměřena na jednu povrchovou úpravu (OSP).

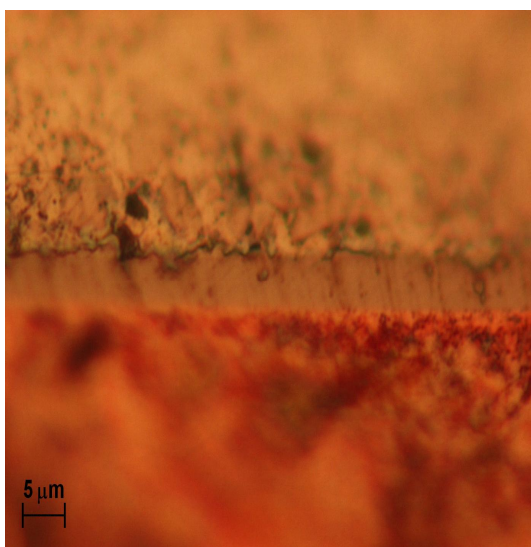


a) 0 hodin

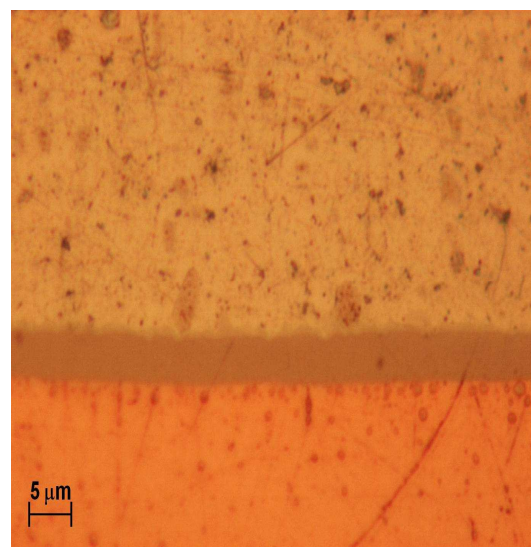


b) 500 hodin

Obr. 2.29: Mikrovýbrusy pájených spojů s povrchovou úpravou Ni/Au, kulový vývod o průměru 0,4 mm - zvětšeno 1000x



a) 0 hodin



b) 500 hodin

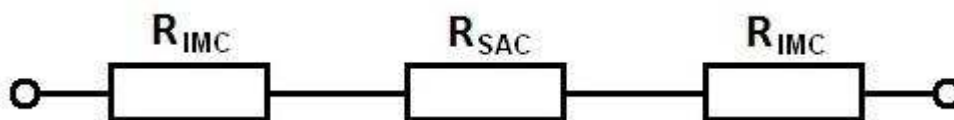
Obr. 2.30: Mikrovýbrusy pájených spojů s povrchovou úpravou Ni/Au, kulový vývod o průměru 0,76 mm - zvětšeno 1000x

Izotermální stárnutí je typ zrychlené zkoušky s konstantním zatížením. Používá se pro

2.6.6 Vliv IMC vrstvy na vodivost pájeného spoje

Jak již bylo řečeno výše vznik intermetalické vrstvy je pro kvalitní pájený spoj nutný. Je tím signalizováno, že proces pájení proběhl úspěšně. Na druhou stranu IMC vrstvy snižují elektrickou vodivost pájeného spoje. Důkazem je porovnání elektrické vodivosti v tab. 1.9. Například vrstva Cu_6Sn_5 má až 10x vyšší rezistivitu než měď.

Zapájený spoj je možné si představit jako sériové zapojení tří odporů (viz. obr. 2.31). Odpor R_{SAC} představuje samotnou pájecí slitinu SAC405 a odpor R_{IMC} značí intermetalickou vrstvu. Odpor R_{IMC} je ve schématu zakreslen dvakrát, protože v zapájeném spoji jsou dvě rozhraní Cu/Sn, kde se tyto IMC vrstvy tvoří.



Obr. 2.31: Náhradní schéma zapájeného spoje

Intermetalické vrstvy s časem a teplotou narůstají. A to tak, že čím vyšší je provozní teplota spoje, tím je také vyšší rychlost růstu IMC vrstvy. Je také vhodné dobře dimenzovat pájený spoj na požadovaný proud, aby se spoj zbytečně neohříval.

2.6.7 Možné směry vývoje této práce

- Použití dusíkové atmosféry při procesu pájení
- Použití střídavé měřicí metody k měření elektrické vodivosti pájeného spoje
- Vytvoření dalších mikrovýbrusů z archivovaných izotermálně stárnutých vzorků a poté vytvoření zbývajících časových závislostí růstu IMC vrstvy
- Vytvoření automatizovaného měřicího pracoviště

Vytvoření automatizovaného měřicího pracoviště

V diplomové práci byla proměřována elektrická vodivost na celkem dvanácti testovaných DPS v 10 časech izotermálního stárnutí (včetně referenčního – stárnutí 0 hodin). Na každé DPS je k proměření 24 spojů, celkem tedy bylo odečteno 2880 hodnot. Proměření 12 DPS pro jeden výše uvedený čas trvalo přibližně 3,5 hodiny. Tato zmíněná čísla již stojí za důkladné zvážení pro návrh automatizovaného měřicího pracoviště.

Měřicí pracoviště uvedené na obr. 2.18 by bylo rozšířeno pouze o počítač. Multimetr MIT 291 by byl nahrazen např. přesným nanovoltmetrem Agilent 34420A. Tento voltmetr má ve své hardwarové výbavě sériové rozhraní RS232 a konektor pro sběrnici GPIB. Obě rozhraní je možné pomocí převodníku převést na sběrnici USB. V současné době jsou počítače vybaveny sériovým rozhraním pouze pomocí rozšiřující karty, a proto použití převodníku na USB sběrnici je nezbytné.

Největší změnu by prodělal přípravek pro přepínání jednotlivých pájených spojů. Zde by se opět jednalo o propojení s počítačem pomocí USB portu. V přípravku by komunikaci a převod z USB na RS232 [33] prováděl integrovaný obvod FT232 od firmy FTDI. Pro komunikaci obvodu FT232 se všemi multiplexery by se pomocí dvou datových linek vytvořila I²C sběrnice - signály SDA a SCL [34]. Pro přepínání jednotlivých spojů by byla využita stromová struktura složená z pěti multiplexerů (elektronických přepínačů). Jeden hlavní multiplexer (výběr za čtyři konektorů) a čtyři podružné multiplexery (jeden pro každý konektor), které by přepínaly jednotlivé pájené spoje vybraného konektoru. U všech multiplexerů by bylo nutné použít dvojitého typu multiplexeru (hlavní – typ 2 x 4:1, podružný – typ 2 x 8:1), protože je potřeba přepínat obě napěťové měřicí svorky.

Možným dalším vylepšením by bylo použít v přípravku místo integrovaného obvodu FT232 [35] obvod FT2232 [36], který je dvoukanálový a konvertuje USB na dva plnohodnotné porty RS232. Voltmetr by se místo do počítače připojil do prepínacího přípravku. Situace by byla taková, že první RS232 by sloužil pro naměřená data z voltmetru a druhý by prepínal měřené spoje. Pozitivní by byl pokles pořizovacích nákladů na další převodník pro voltmetr.

Posledním krokem by bylo vytvořit řídicí program např. ve vývojovém prostředí C++, Visual Basic nebo VEE Pro.

3 ZÁVĚR

Úkolem diplomové práce bylo navázat na teorii ze semestrálního projektu 2. Na začátku práce jsou popsány požadavky na pájený spoj z hlediska jeho správné funkce. Je vysvětlena souvislost smáčení (úhlu smáčení) s pájitelností povrchu. Dále je více přiblíženo měření smáčecích charakteristik metodou smáčecích vah a postup pro vytvoření mikrovýbrusu. Neméně důležité bylo rozebrat faktory ovlivňující životnost pájeného spoje. Pro bezolovnaté pájení jsou rozebrány pájecí slitiny především slitiny SAC305 a SN100C. Pro testování byly vybrány povrchové úpravy OSP a ENIG (chemický nikl/imersní zlato). Poslední část teorie je věnována elektrické vodivosti, jejím změnám a faktorům ovlivňující elektrickou vodivost pájeného spoje.

Na začátku praktické části jsem navrhnul konstrukci nové DPS. Výroba nových DPS byla zadána do profesionální výroby firmě ČEMEBO s.r.o., která spolupracovala v kooperaci s firmou Gatema s.r.o. Byl zvolen odlišný přístup návrhu – pájecí plochy definované nepájivou maskou. Pájecí plošky mají průměr 1 mm, odhalená měď pro pájení má však pouze průměr 0,63 mm. Navržené DPS byly použity i pro jiné bakalářské a diplomové práce, ve kterých byly prováděny například trhací zkoušky. Nové DPS mají oproti starým tu výhodu, že je nižší pravděpodobnost, že se při trhacích zkouškách měděná pájecí ploška separuje od materiálu FR4.

Pro zjištění dostatečné adheze nepájivé masky jsem udělal mikrovýbrusy pro několik pájených spojů. Zjistil jsem, že i po zapájení v přetavovací peci je pájecí slitina pouze na měděné ploše definované nepájivou maskou.

Přesným proměřením pájecích plošek bylo možné vypočítat poměr plocha spoje/objem pájky (S/V). Se zvyšujícím se průměrem použité kuličky pájky klesá poměr plocha spoje/objem pájky. Čím větší je tento poměr S/V , tím rychleji dojde k saturaci mědi ve spoji a začíná růst intermetalické vrstvy.

Povrchová úprava OSP má nízkou dobu skladování a již nevyhovovala zamýšleným experimentům. Z tohoto důvodu musela být odstraněna a nanesena nová. Nanesení proběhlo v laboratoři VUT a byla použita povrchová úprava OSP Gliccoat F2. Pro porovnání povrchových úprav OSP byl proveden test smáčivosti nového vzorku z firmy ČEMEBO a vzorku s OSP Gliccoat F2. Průběhy byly podobné jen maximální smáčecí síla byla u vzorku s OSP Gliccoat F2 vyšší. Pro zajímavost byla proměřena elektrická vodivost uskladněných vzorků. Při porovnání s novými byla hodnota nižší asi o 4 %.

Pro pájení přetavením byla použita průběžná přetavovací pec DIMA SMRO 0180. Tato pec nedosahovala potřebné maximální teploty udávané v teplotním profilu výrobce pájecí slitiny SAC405. Proto byla umístěna do skleněného boxu, kde se této teploty již dosáhlo. Poté byly podle teplotního profilu experimentálně nastaveny teploty jednotlivých zón pece a rychlost dopravníku. Byl vypočítán integrál dodané energie při pájení $Q = 1239,89 \text{ K s}$.

Pro test izotermálního stárnutí při 150°C byly vybrány dvě povrchové úpravy OSP a ENIG a tři průměry kuliček pájky (0,4 mm, 0,5 mm a 0,76 mm). Bylo tedy připraveno 9 zapájených DPS. Měření elektrické vodivosti proběhlo před započítáním testu a poté v časech 1, 2, 8, 24, 48, 96, 200, 350 a 500 hodin izotermálního stárnutí. Delší stárnutí nebylo z časových důvodů možné. Všechny naměřené křivky byly co se týče tvaru velmi podobné. Hodnoty elektrické vodivosti povrchové úpravy Ni/Au – Ni/Au jsou oproti ostatním nižší. V prvních hodinách stárnutí došlo k rekystalizaci (uspořádání) a tím ke zvýšení elektrické vodivosti. Poté již vodivost klesala.

Paralelně k výše zmíněnému testu byly vytvořeny tři DPS s povrchovou úpravou OSP – Ni/Au s různými průměry pájecích vývodů. Tyto DPS byly kromě izotermálního stárnutí navíc proudově zatíženy proudem o hodnotě 1 A. Z výsledků je vidět, že proud 1 A nevyvolal změnu elektrické vodivosti.

Dalším zkoumáním bylo zjišťování růstu intermetalické vrstvy pájeného spoje. V jednotlivých časech izotermálního stárnutí byly odebírány připravené vzorky. Vybrané vzorky byly zality do pryskyřice (dentacryl) a po vytvrzení vybroušeny. Z časových důvodů byly provedeny mikrovýbrusy pro povrchovou úpravu OSP – OSP pro průměr kuliček pájky 0,4 mm a 0,76 mm ve čtyřech časech izotermálního stárnutí. Pro srovnání v časech 0 hodin a 500 hodin byly vytvořeny mikrovýbrusy vzorků s povrchovou úpravou Ni/Au - Ni/Au pro průměr pájky 0,4 mm a 0,76 mm. Pozorováním mikrovýbrusů pod optickým mikroskopem jsem mohl změřit tloušťky IMC vrstev. Pro jednotlivé časy byly tloušťky vrstev vypočítány pomocí vzorce 1.3. Odchylky naměřených a vypočítaných hodnot byly v řádu procent.

V poslední části diplomové práce jsou uvedeny další možné směry vývoje této práce. Například zkvalitnění pájecího procesu snížením koncentrace O_2 pomocí dusíkové atmosféry. Použití střídavé měřicí metody měření elektrické vodivosti a případné rozšíření jednoduchého rezistivního modelu pájeného spoje. Vyrobení dalších mikrovýbrusů z archivovaných vzorků a sestrojení zbývajících časových závislostí růstu IMC vrstvy. V posledním bodě této kapitoly jsem popsal možné návrhové řešení automatizovaného měřicího pracoviště pro měření elektrické vodivosti pájeného spoje.

LITERATURA

- [1] STARÝ, J.; ZATLOUKAL, M.; STEJSKAL, P. *Montážní a propojovací technologie*. pracovní verze 90503, 2009.
- [2] FREAR D.R., JANG J.W., LIN J.K., ZHANG C. *Pb-Free Solders for Flip-Chip Interconnects*. [online]. 2001. Dostupné z: <http://www.tms.org/pubs/journals/JOM/0106/Frear-0106.html>
- [3] SUGANUMA, K. *Lead-free soldering in electronics*. 1th printing, 2004. ISBN 0-8247-4102-1.
- [4] HWANG, J. S. - *Environment - friendly electronics: Lead free technology*, Electrochemical Publications Ltd 2001 - ISBN 0 901150 40 1
- [5] SZENDIUCH, I. *Pájení a bezolovnaté pájky* [online]. [cit. 2010-12-05]. Dostupné z: <http://www.printed.cz/assets/photos/pb-free.pdf>
- [6] PÍCHA, J. *Studium spolehlivosti bezolovnatých pájených spojů*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2010. 82 s.
- [7] DUŠEK, K; URBÁNEK, J; DRÁPALA, J. *Měření pájitelnosti mědi, niklu a mosazi pro různé druhy pájek a tavidel*. [online]. FEL ČVUT Praha, VSB Ostrava [cit. 2010-12-05]. Dostupné z: <http://ketsrv.fel.zcu.cz/diagnostika/konference/Sbornik/Sekce3/50.pdf>
- [8] LABAJ, R. *Vliv smáčecích charakteristik na spolehlivost pájeného spoje*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2010. 70 s.
- [9] *Vitronics Soltec* [online]. 2006 [cit. 2010-12-05]. Dostupné z: <http://www.vitronics-soltec.com>.
- [10] *Solder Datasheets*. [online]. [cit. 2010-12-05]. Dostupné z: <http://www.metallicresources.com>
- [11] *Production Supply Solutions* [online]. [cit. 2010-12-05]. Dostupné z: <http://www.productionsupplysolutions.com/Lead-Free-Solder-Sn99-4901-112G-p/4901-112g.htm>
- [12] LAČNÝ, R. *Elektrická vodivost pájeného spoje a vliv na spolehlivost*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2010. 63 s.
- [13] MIKULČÁK, J. a kolektiv. *Matematické, fyzikální a chemické tabulky pro střední školy*. 3. vydání, 1988. ISBN 80-85849-84-4.
- [14] *Solder Alloys Specification*. [online]. [cit. 2010-12-05]. Dostupné z: <http://www.williams-adv.com/packagingMaterials/lead-free-solder.php>
- [15] *Production Supply Solutions* [online]. [cit. 2010-12-05]. Dostupné z: <http://www.productionsupplysolutions.com/Lead-Free-Solder-Sn96-SAC-305-4900-112G-p/4900-112g.htm>
- [16] *Lead free soldering flux*. [online]. 2007, [cit. 2010-04-13]. Dostupný z: <http://www.wsbenelux.nl/producten/kester/pdf/tsf6592%20global%20%2805jun07%29.pdf>
- [17] *Ecofrec TF40*. [online]. Nedatováno. Dostupné z: http://www.jamiel.cz/files/products/avantec/Ecofrec_TF_40.pdf

- [18] NIST, *Properties of Ince* [online]. 2007, [cit. 2012-05-15]. Dostupný z: <http://www.nist.org>
- [19] FALDYNA, M. *Vliv intenzity chlazení na růst intermetalických vrstev v bezolovnatém pájeném spoji*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2008. 47 s.
- [20] Indium Corporation, *Solder alloy directory* [online]. [cit. 2012-15-05]. Dostupné z: http://www.indium.com/_dynamo/download.php?docid=453
- [21] SENJU Metal Industry Co., Ltd, *Solder balls #7097 (SAC405)* [online]. [cit. 2012-15-05]. Dostupné z: <http://www.senju-m.co.jp/en/index.html>
- [22] VANĚK, J., KŘIVÍK, P., NOVÁK, V. *Alternativní zdroje energie – laboratorní cvičení*. BRNO: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2007.
- [23] KIC, *SlimKIC 2000* [online]. Datasheet, 2 s., [cit. 2012-15-05]. Dostupné z: <http://kicthermal.com/images/stories/pdf/SlimKIC-2000-en-R1102A.pdf>
- [24] BELL, H. *How evaluate a reflow profile* [online]. 2011, [cit. 2012-05-10]. Dostupný z: http://www.ute.feec.vutbr.cz/TD/REHM/BELL_2.pdf
- [25] *Elektrotechnická měření*. 1. vyd. Praha: BEN - technická literatura, 2002, 255 s. ISBN 80-7300-022-9.
- [26] SONG, F., RICKY LEE, S. W. *Investigation of IMC Thickness Effect on the Lead-free Solder Ball Attachment Strength: Comparison between Ball Shear Test and Cold Bump Pull Test Results* [online]. 2006, 8 s. [cit. 2012-05-10]. Dostupný z: <http://ecadigitallibrary.com/pdf/56thECTC/s26p6xq.pdf>
- [27] XU, L., PANG, J. H. L., CHE, F. X. *Intermetallic Growth and Failure Study for Sn-Ag-Cu/ENIG PBGA Solder Joints Subject to Thermal Cycling* [online]. 2005, 5 s. [cit. 2012-05-10]. Dostupný z: http://ecadigitallibrary.com/pdf/55thECTC/55ECTC162_gqa.pdf
- [28] MEI, Z. *Lead-free solder interconnect reliability*, ed. Shangguan, D. (Materials Park: ASM International), 1th printing, 2005. ISBN 0-87170-816-7.
- [29] POLSTEROVÁ, H. *Základy spolehlivosti elektrotechnických výrob – skripta*. BRNO: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2006, 127 s.
- [30] PAN, J., SILK, J., POWERS, M., HYLAND, P. *Effect of Gold Content on the Microstructural Evolution of SAC305 Solder Joints Under Isothermal Aging* [online]. 2011, 8 s. [cit. 2012-05-10]. Dostupný z: <http://digitalcommons.calpoly.edu>
- [31] PAN, J., SILK, J., POWERS, M., HYLAND, P. *Effect of Gold Content on the Reliability of SnAgCu Solder Joints* [online]. 2011, 8 s. [cit. 2012-05-10]. Dostupný z: <http://digitalcommons.calpoly.edu>
- [32] PAN, J., SILK, J., POWERS, M. *The Morphology Evolution and Voiding of Solder Joints on QFN Central Pads with a Ni/Au Finish* [online]. 2012, 12 s. [cit. 2012-05-10]. Dostupný z: <http://digitalcommons.calpoly.edu>
- [33] MACH, L. *Simulace a realizace laboratorního napájecího zdroje*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií. Ústav radioelektroniky, 2010. 61 s.
- [34] MATOUŠEK, D. *USB prakticky obvody FTDI*. 1.díl, Praha: BEN – technická literatura, 272 s., 2003.

- [35] Future Technology Devices International Ltd. *FT232BM USB UART IC* [online]. Datasheet, 2009, 31 s., [cit. 2012-05-10]. Dostupné na: <http://www.ftdichip.com>.
- [36] Future Technology Devices International Ltd. *FT2232H Hi-Speed Dual USB UART/FIFO IC* [online]. Datasheet, 2010, 65 s., [cit. 2012-05-10]. Dostupné na: <http://www.ftdichip.com>.

SEZNAM SYMBOLŮ, VELIČIN A ZKRATEK

α	Teplotní součinitel elektrického odporu
γ	Měrná elektrická vodivost - konduktivita
γ_{SF}	Povrchové napětí na rozhraní pájený povrch / tavidlo / vzduch
γ_{LS}	Povrchové napětí na rozhraní pájený povrch / pájecí slitina
γ_{LF}	Povrchové napětí na rozhraní tavidlo / vzduch
ENIG	Electroless Nickel / Immersion Gold
g	Gravitační zrychlení
G	Elektrická vodivost
G_0	Počáteční elektrická vodivost
F	Rovnovážná smáčecí síla
hm %	Hmotnostní procento
I	Proud
IACS	International Annealed Copper Standard
IMC	InterMetallic Compound
J	Proudová hustota
l	Délka
OSP	Organic Solderability Preservative
p	Obvod
Q	Aktivační energie
Q_h	Integrál dodané energie
ρ	Hustota nebo měrný elektrický odpor – rezistivita
R	Elektrický odpor
R_{IMC}	Odpor intermetalické vrstvy
R_{SAC}	Odpor pájecí slitiny SAC
S	Obsah kolmého průřezu
SMD	Surface Mount Device
σ	Směrodatná odchylka
T	Teplota
T_p	Vrcholová teplota
ΔT	Rozdíl teplot

TAL	Time About Liquid
Θ	Smáčecí úhel
$U_{\text{stárnuté}}$	Napětí na stárnutém vzorku
$U_{\text{nestárnuté}}$	Napětí na nestárnutém vzorku
V	Objem
w_0	Tloušťka intermetalické vrstvy v čase 0 hodin